

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA-BEJAIA



Faculté des Sciences de la Nature et
de la Vie Département de
Sciences Alimentaires

Laboratoire ou unité de recherche de rattachement : Laboratoire de Biochimie,
Biophysique, Biomathématique et Scientométrie (L3BS)

THÈSE

Présentée par

M^{me} TOUATI Née HIHAT Soraya

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR EN SCIENCES

Filière : biologie

Option: Alimentation et Technologie alimentaire

Thème

**Modélisation des cinétiques de séchage par US-MO de la
coriandre**

Soutenu le : 18 / 01 /2025

Devant le Jury composé de :

Nom et Prénom	Grade		
Mme BOULEKBACHE Lila	Professeur	Université de Bejaia	Président
Mr. MADANI Khodir	Professeur	Université de Bejaia	Rapporteur
Mr. BENDIF Hamdi	Professeur	Université de Msila	Examineur
Mr. MENNANI Achour	MCA	Université de Msila	Examineur
Mme NASRI Meriem.	MCA	Université de Bordj Bou Arreridj	Examineur

Année Universitaire : 2024/2025

Remerciements

En tout premier lieu, je remercie Dieu, le tout puissant, de m'avoir données la force pour survivre, de nous avoir accordé la santé, le courage et la volonté pour dépasser toutes les difficultés et réaliser ce travail.

L'encadrement de ce travail a été assuré par Monsieur **MADANI K.**, Professeur à l'Université de Bejaia et directeur du Centre de Recherche en Technologies Agro-Alimentaires. Je tiens vivement à lui exprimer ma profonde reconnaissance et gratitude pour sa disponibilité, sa patience, sa compréhension, ses qualités humaines, je le remercie pour ses encouragements, ses conseils et critiques dont il a su prouver à mon égard, à son expérience dont il n'a jamais manqué de me faire profiter.

Je tiens à remercier Mme **BOULEKBACHE L.**, Professeure et directrice du Laboratoire de Biochimie, Biophysique, Biomathématique et Scientométrie à l'Université de Bejaia, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence du jury. Qu'elle trouve ici l'expression de ma profonde gratitude et de mon respect.

Mes remerciements vont également à Monsieur **BENDIF H.**, Professeur à l'Université de M'sila, pour avoir consacré de son temps afin d'évaluer et de critiquer ce travail. Je suis particulièrement reconnaissante et honorée par sa participation au jury de cette thèse.

Il m'est aussi agréable de remercier Madame **NASRI M.**, Maître de conférence classe A, à l'université de Bordj Bou Arreridj, pour avoir accepté de juger ce travail. Qu'elle trouve ici l'expression de ma gratitude.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur **MENNANI A.**, Maître de conférence classe A au sein de l'Université de Msila, qui sans hésitation a répondu favorablement pour être membre du jury, qu'il trouve ici l'expression de toute ma gratitude.

Je tiens à remercier particulièrement :

Monsieur **ERTEKIN C.**, Professeur à l'Université d'Akdeniz (**Turquie**), Faculté d'Agriculture (Département d'Ingénierie des Machines et Technologies Agricoles, Antalya) de m'avoir accepté au sein de leurs laboratoires et pour son aide pour la réalisation d'une partie de la thèse et pour tous ses conseils les plus précieux. Son œil critique aiguisé, sa rigueur et sa passion pour la recherche ont été des atouts indéniables.

Je suis également reconnaissante envers Monsieur **TOUATI. N.**, pour avoir dès le début cru en mon potentiel scientifique. Il est un chercheur passionné qui a su être un facteur de motivation, en me présentant d'innombrables idées et suggestions pour mon travail.

A la mémoire de ma chère mère,

A mon cher père

A mon cher époux et mes enfants

A mon frère et mes sœurs

A toute ma famille,

Ainsi qu'à tous mes amis

Soraya

TABLE DES MATIERES

Remerciements

Dédicaces

Table des matières

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....1

PREMIERE PARTIE: PARTIE THEORIQUE

CHAPITRE I. Généralités sur la coriandre

1. Définition	5
2 .Classification et noms vernaculaires	5
3. Botanique, origine et culture de la coriandre.....	6
3.1. Répartition géographique	7
3.2. Antioxydants de la coriandre	7
3.2 .1 .Polyphénols	7
4. Les bienfaits thérapeutiques de la coriandre	8
4.1. Activité antioxydante	8
4.2. Activité antibactérienne.....	9
4.3. Activité antidiabétique	9
4.4. Effet abaissement du cholestérol.....	10
4.4. Activité diurétique et effet hypotenseur	10

CHAPITRE II. Généralités sur le séchage

1. Introduction.....	13
2. Notion de l'activité de l'eau.....	13
2.1. Principe et objectif du séchage.....	14
2.1.1. Principe.....	14
2.1.2. Objectif	14
2.2. Mécanismes intervenants au cours du séchage	14
2.2.1. Techniques de séchage et modes d'apport de chaleur.....	14
2.2.2. Transferts de matière.....	15
3. Technologies de séchage.....	15
3.1. Au soleil.....	15

3.2. Séchage à l'air chaud	16
3.3. Séchage non conventionnel (micro-ondes).....	17
3.3.1. Définition des micro-ondes	17
3.3.2. Principe.....	18
3.3.4. Avantages et inconvénients du séchage par micro-ondes	20
4. Prétraitement par ultrasons.....	21
4.1. La physique des ultrasons.....	21
4.2. Les ultrasons dans l'industrie alimentaire	22

CHAPITRE III. Modélisation mathématique pour les techniques de séchage

1. Introduction.....	25
2. Théorie diffusionnelle	26
3. Théorie capillaire	27
4. Théorie de l'évaporation-condensation	28
5. Théorie de la diffusion de la vapeur d'eau.....	29
6. Modèles empiriques	30
6.1. Modèle de Lewis	31
6.2. Modèle de Page.....	31
6.3. Modèle modifié de Page	31
6.4. Modèle de Henderson et Pabis.....	32
6.5. Modèle logarithmique.....	32
3.6.2 .Modèle à deux paramètres	33
3.6.5. Modèle modifié de Henderson et Pabis.....	34
3.6.6. Modèle de Thompson.....	35
3.6.7. Modèle empirique de Wang et Singh.....	35
3.6.8. Modèle de Kaleemullah	35

CHAPITRE IV. Les huiles essentielles de la coriandre

1. Généralités sur les huiles essentielles	37
2. Répartition, localisation et fonction	37
3. Méthodes d'extraction des huiles essentielles	38
4. La filière des huiles essentielles	39
4.1. Secteur parfumerie/ cosmétique.....	39
4.2. Secteur parfumerie technique.....	39
4.3.Secteur alimentaire	39
4.4.Secteur médecine.....	39

DEUXIEME PARTIE.: PARTIE EXPERIMENTALE

CHAPITRE I : Optimisation de l'extraction par microondes des composés phénoliques par MSR

1. Introduction	42
2. Matériel et méthodes	44
2.1. Réactifs chimiques.....	44
2.2. Préparation des échantillons	44
2.3. Travail expérimental	44
2.4. Procédé d'extraction assistée par micro-ondes	46
2.5. Paramètres de réponse.....	46
2.5.1. Détermination des composés phénoliques totaux	46
2.5.2. Évaluation de la capacité antioxydante totale	46
3. Résultats et discussion	48
3.1. Effet des facteurs uniques	48
3.2. Optimisation par méthodologie de surface de réponse.....	50
3.2.1. Construction du plan d'expérience	50
3.2.2. Analyse du modèle	52
3.2.3. Analyse des graphiques décrivant l'effet des facteurs	55
3.2.4. Validation du Modèle	57

CHAPITRE II : Cinétiques de séchages et effets du séchage par étuve et microonde sur la qualité nutritionnelle de la coriandre

1. Introduction	
2.1. Matériel végétal.....	63
2.2. Processus de séchage et cinétiques expérimentales de séchage.....	63
2.2.1. Procédé de séchage par étuve ventilée	63
2.2.2. Processus de séchage par micro-ondes	64
2. 2.4. Le coefficient de diffusion effective (<i>Deff</i>).....	67
2. 3. Qualités pytochimiques	68
2. 3.1. Extraction et détermination des composés phénoliques totaux.....	68
2.3.2. Flavonoïdes totaux.....	69
2.4. Evaluation de l'activité antioxydante	69
2.4.2. Pouvoir réducteur	70
21.Taux d'humidité	71
II.2. Evaluation des courbes de séchage.....	71
II.2.1. Cinétiques de séchage par étuve	71
II.2.2. Cinétique de séchage par microonde.....	74
II.3. Comparaison entre le séchage par micro-onde et par étuve	77
II.4. Modélisation mathématique du processus de séchage	78
II.6. Qualité phytochimique	82
II.6.1. Dosages des polyphénols totaux	83
II.6.2. Flavonoïdes totaux.....	86
II.7. Les activités antioxydantes	87
II.7.1. Piégeage du radical DPPH	88

CHAPITRE III :

Amélioration du séchage par micro-onde de la coriandre par l'application des Ultrasons

1. Introduction	94
2. Matériel et méthodes	96
21. Préparation de l'échantillon	96
2.2. Prétraitement par ultrasons.....	96
2.3. Séchage par microonde	97
2.4. Modélisation mathématique	97
2.5. Evaluation des paramètres de qualités.....	99

2.5.1. Extraction et détermination des substances phénoliques.....	99
2.5.2. Activité antiradicalaire ABTS.....	100
2.6. Analyse statistique.....	100
3. Résultats Et Discussion.....	101
3.1. Cinétiques du séchage.....	101
3.2. Modélisation mathématique du séchage US-MO.....	104
3.3. Effet des traitements de séchage sur les substances antioxydantes.....	105
3.3.1 Composés phénoliques.....	105
3.2. Activité anti-ABTS.....	106
Conclusion.....	108

CHAPITRE IV :

Activités antioxydantes, anti-microbiennes et Anti-inflammatoires des huiles Essentielles des graines de coriandre

1. Introduction.....	110
2. Matériel et méthodes.....	112
2.1. Matériel végétale.....	112
2.2. Extraction des huiles essentielles.....	112
2.3. Caractérisation physico-chimique.....	112
2.3.1. Détermination du pH.....	112
2.3.2. Indice de réfraction.....	113
2.3.3. Densité.....	113
2.4. Evaluation de l'activité antioxydante des huiles essentielles.....	113
2.5. Evaluation de l'activité anti inflammatoire, In Vitro.....	114
2.6. Evaluation de l'Activité antimicrobienne.....	115
2.6.1. Activité antibactérienne.....	115
2.6.2. Evaluation de l'activité antifongique.....	117
3. Résultats et discussion.....	118
3.2. Activités antioxydantes.....	120
3.3. Activité antimicrobienne.....	122
3.4. Sensibilité des souches bactériennes à l'huile essentielle des graines de la coriandre.....	122
Conclusion générale.....	135
Références bibliographiques.....	138

LISTE DES ABREVIATIONS

ABTS: 2, 20-azino-bis-3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonic acid;

ANOVA : Analyse de la Variance ;

ATB : Antibiotiques

BSA : Bovin Sérum Albumine

C_T : Constante concernant l'augmentation de température produite lorsque le solide adsorbe l'humidité (°K) ;

DB: dry basis

DCPIP : 2,6 dichlorophenolindophenol

DPPH : 1,1-Diphényl-2-picrylhydrazyle

D : Coefficient de diffusion moléculaire (m s^{-1})

D_{ch} : Coefficient de diffusion de chaleur

D_{eff} : Coefficient de diffusion

DMSO : Diméthyle sulfoxyde

D_o : Coefficient de diffusion de référence (m^2s^{-1})

E. Coli : *Escherichia coli*

E_a : Énergie d'activation (J mol^{-1})

FeCl₃ : Chlorure ferrique

FOC : *Fusarium oxysporum*

FS : *Fusarium Solani*

G⁻ : Gram négatif

G⁺ : Gram positif

GEN : Gentamicine

H.E : Huile essentielle

IC₅₀ : Concentration inhibitrice à 50%

Jc : Flux liquide dû à la capillarité ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

Kh : Conductivité hydraulique insaturée ($\text{m s}^{-1} (\text{m}^2 \text{s}^{-1})$) ;

KH₂PO₄:Potassium dihydrogen phosphate

K₂HPO₄ : Potassium phosphate dibasic

MAE: Microwave assisted extraction

MD: Microwave drying

MeOH: Méthanol

MW: Microwave;

WB : Weight basis

Rg : Constante universelle des gaz parfaits ($\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$).

W : Masse de substance diffusante dans le solide (kg kg^{-1}) ;

W : Teneur en eau (% db)

LISTES DES FIGURES

Figure 1. Chromolithographie représentant <i>Coriandrum sativum</i> L	6
Figure 2. Différentes parties de l'espèce végétale <i>Coriandrum sativum</i> L	7
Figure 3. Spectre électromagnétique	18
Figure 4. Frissonnement des dipôles soumis à une irradiation micro-ondes	19
Figure 5. Transferts thermiques sous les deux modes de chauffage	20
Figure 6. Mode d'extraction des huiles essentielle	38
Figure 7. : Effets de la concentration en solvant et de la puissance des micro-ondes (a), de la concentration en solvant et temps d'irradiation (b), et puissance micro-ondes et temps d'irradiation	56
Figure 8. Effet de la température de séchage sur la teneur en humidité des feuilles de coriandre.	72
Figure 9. Courbes du taux d'humidité des feuilles de coriandre séchées par étuve à différentes températures	72
Figure 10. Effet de la puissance du séchage sur la teneur en d'humidité des feuilles de coriandre	75
Figure 11. Courbes du taux d'humidité des feuilles de coriandre séchées par micro-ondes à différentes puissances.	76
Figure 12. MR prédit contre MR expérimental par le modèle de Midilli et al. à 100 °C.	79
Figure 13. MR prédit par rapport à MR expérimental selon le modèle de Midilli et al. à 700 W.	80
Figure 14. Effet du séchage conventionnel (A) et par micro-ondes (B) sur le contenu phénolique total des feuilles de coriandre	84
Figure 15. Effet du séchage conventionnel (A) et par micro-ondes (B) sur le contenu en flavonoïdes des feuilles de coriandre	85

Figure 16. Effet du séchage conventionnel (A) et par micro-ondes (B) sur l'activité antioxydante DPPH	89
Figure 17. Effet du séchage conventionnel (A) et par micro-ondes (B) sur le pouvoir réducteur des feuilles de coriandre.	91
Figure 18. Bain à ultrasons	97
Figure 19. Taux d'humidité des tiges de coriandre en fonction du temps de séchage pour différents traitements (avec et sans ultrasons)	102
Figure 20. Teneur en polyphénols totaux des tiges de coriandre séchées au microonde en combinaison avec des ultrasons	106
Figure 21. Inhibition radicalaire ABTS des tiges de coriandre séchées au microonde en combinaison avec des ultrasons.	107
Figure 22 : Pourcentage d'inhibition du DPPH en fonction des concentrations de l'huile essentielle de <i>Coriandrum sativum</i> L.	120
Figure 23. Zones d'inhibition de l'extrait sur certaines bactéries	120
Figure 24. IC 50 pour l'huile essentielle de <i>Coriandrum sativum</i> L.	121
Figure 25 : Zones d'inhibition de l'extrait sur certains bactéries	124
Figure 26. Représentation graphique des diamètres d'inhibition de <i>E.Coli</i>	125
Figure 27. Représentation graphique des diamètres d'inhibition de <i>Pseudomonas aerogénosa</i> vis- à- vis de différents antibiotiques.	125
Figure 28. Représentation graphique des diamètres d'inhibition de <i>Micrococcus Luteus</i> vis-à-vis de différents antibiotiques	126
Figure 29. Représentation graphique des diamètres d'inhibition de <i>S.aureus</i> vis-à-vis de différents antibiotiques	126
Figure 30. Pourcentages d'inhibition de la dénaturation de BSA par l'extrait et le standard	132

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Variables indépendantes affectant l'extraction assistée par micro-ondes	41
Tableau 2	Résultats d'expériences à facteur unique pour l'extraction assistée par micro-ondes des feuilles de coriandre	49
Tableau 3	Matrice de plan de Box-Behnken, valeurs expérimentales et prédites des composés phénoliques totaux et la capacité antioxydante totale.	50
Tableau 4	Analyse de la variance du modèle et du manque d'ajustement pour les composés phénoliques totaux et la totale capacité antioxydante des feuilles de coriandre.	51
Tableau 5	Coefficient de régression, erreur type et résultats du test t de Student de la surface de réponse de TPC et le TAC fait référence au poids sec des feuilles de coriandre	53
Tableau 6	Modèles à couches minces pour le séchage des fruits et légumes	65
Tableau 7	Résultats statistiques des différents modèles de séchage à l'étuve et microonde	80
Tableau 8	Valeurs des diffusions effectives obtenues pour la coriandre à différentes conditions de séchage.	82
Tableau 9	Qualités photochimiques des feuilles de coriandre séchée par étuve et microonde	83
Tableau 10	Modèles mathématiques appliqués aux courbes de séchage de la coriandre	98
Tableau 11	Paramètres du modèle de Midilli et al. décrivant la cinétique du taux de séchage des tiges de coriandre	104
Tableau 12	Le coefficient de diffusion effectif de l'humidité pendant le séchage des tiges de coriandre en fonction des paramètres de sonication.	105

Tableau 13	Différents concentrations de l'huile utilisée	117
Tableau 14	Caractéristiques physicochimiques des huiles essentielles	118
Tableau 15	Résultats du test antioxydant exprimant la concentration efficace 50% en mg/ml	122
Tableau 16	Diamètre des zones d'inhibition des huiles de la coriandre contre les souches bactériennes	123
Tableau 17	Diamètres d'inhibition des chaque bactérie vis-à-vis des antibiotiques testées	125
Tableau 18	L'activité antimicrobienne de l'huile essentielle a été étudiée par d'autres auteurs.	127
Tableau 19	Diamètres (mm) des zones d'inhibition de l'huile essentielle des graines de coriandre, relatifs aux souches <i>Fusarium oxysporum</i> testées.	128
Tableau 20	Diamètre des zones d'inhibition des huiles relatives contre <i>Fusarium solani</i> .	130

Première partie
Synthèse bibliographique

Introduction générale

Introduction générale

Les fruits et légumes sont une source essentielle de nutriments et de vitamines indispensables au bon fonctionnement du corps humain. Souvent saisonniers, ils nécessitent un traitement pour un stockage à long terme. Leur détérioration rapide est principalement due à leur forte teneur en humidité, pouvant atteindre jusqu'à 90 %. Cette humidité favorise la prolifération des microorganismes et des enzymes, ce qui accélère la pourriture des fruits et légumes fraîchement récoltés. La méthode la plus courante pour remédier à ce problème consiste à éliminer l'humidité par le séchage des produits (**Mittal et al., 2019**).

La demande croissante de légumes secs de haute qualité et stables à l'étalage appelle à une conception, une simulation et une optimisation améliorées du processus de séchage. L'objectif est d'assurer non seulement l'efficacité du processus, mais aussi la qualité finale du produit séché. Le séchage conventionnel, qui expose les produits alimentaires et agricoles à des températures élevées et à des temps de traitement prolongés, peut entraîner d'importantes altérations de la saveur, de la couleur, de la capacité de réhydratation et des nutriments, tout en présentant une faible efficacité énergétique.. (**Drouzas et al., 1999; Sharma et al., 2004 ; Ozbek et Dadalli, 2007**).

Le séchage est la méthode la plus pratique et la plus avantageuse pour conserver les denrées périssables en réduisant le taux d'humidité en dessous du niveau qui susceptible d'être contaminé. Bien qu'il existe de nombreuses méthodes de déshydratation, le séchage demeure l'étape la plus énergivore du traitement des matières premières. La qualité et la rapidité de ce processus influencent considérablement la qualité et le coût du produit final. Le coût des ressources énergétiques sur le marché est élevé, et une tendance à la hausse est attendue dans un avenir proche. Ainsi, il est pertinent de mener des recherches pour réduire la consommation d'énergie lors du séchage des matières premières, notamment des fruits et légumes, tout en améliorant la qualité du produit fini (**Savoiski et Sirenko, 2023**).

De nombreuses méthodes conventionnelles, telles que le séchage au soleil, le séchage sous vide, la lyophilisation et le séchage par flux d'air, donnent des taux de séchage plus faibles mais le séchage par micro-ondes est une méthode de déshydratation efficace en termes de temps et d'énergie. Cette méthode a été combinée avec le séchage à l'air chaud, le séchage sous vide, la lyophilisation, etc. et appliquée dans de nombreuses pratiques de séchage au

cours des dernières décennies (**Li et al., 2017 ; Dujmi et al., 2013**).

On observe un intérêt croissant pour l'utilisation des ultrasons en tant que processus complémentaire ou préalable au séchage. L'utilisation des ultrasons dans le traitement des matières premières alimentaires, des déchets et des sous-produits montre des résultats prometteurs pour diverses applications, tant dans la recherche fondamentale que dans l'industrie. Les ultrasons créent des canaux microscopiques qui facilitent l'élimination de l'humidité dans un milieu solide en produisant des alter compressions et expansions (**Mulet et al., 2011**). Le séchage assisté par ultrasons conduit à une augmentation significative du taux de séchage en raison de la bonne adaptation de l'impédance acoustique entre le transducteur et les matières alimentaires. Une réduction significative du temps de séchage peut être obtenue lorsque les échantillons sont traités par ultrasons (**Savoiski et Sirenko, 2023**).

Les modèles mathématiques sont utilisés pour décrire la cinétique du transfert de masse dans les processus de séchage convectif, en tenant compte de conditions telles que la température et la pression. La modélisation du processus de séchage peut améliorer son efficacité, réduire le temps nécessaire et, par conséquent, optimiser l'utilisation du temps et de l'énergie, tout en augmentant la durabilité du processus. Cette approche offre une méthode simple et rapide pour prédire les paramètres et conditions optimaux afin d'obtenir des résultats souhaités, comme la qualité du produit. De plus, elle constitue un outil précieux pour concevoir et dimensionner des séchoirs adaptés à des exigences spécifiques. De nombreux auteurs ont déjà analysé et amélioré des modèles mathématiques pour le séchage de divers produits alimentaires, tels que les pommes, le kiwi et d'autres fruits (**Aregbesola et al., 2015 ; Jahanbakhshi et al., 2020**).

Par conséquent, l'étude de la cinétique du séchage aidera à identifier les méthodes de séchage appropriées et à contrôler les processus de séchage. Elle est également importante pour l'ingénierie et l'optimisation des processus. Il est parfois coûteux de réaliser une expérience à grande échelle pour déterminer les conditions de séchage appropriées. Ainsi, la cinétique du séchage est utilisée pour exprimer le processus d'élimination de l'humidité et sa relation avec les variables du processus. Une bonne compréhension de la vitesse de séchage est donc importante pour développer un modèle de séchage (**Gupta et Patil., 2014**).

La coriandre, plante médicinale très aromatique, est largement utilisée en cuisine et en cosmétique. Elle se détériore rapidement, même sous réfrigération. En raison de sa haute teneur en eau, la coriandre nécessite un séchage pour prévenir la dégradation microbienne et

nutritionnelle, prolongeant ainsi sa durée de conservation et réduisant les pertes post-récolte. Le séchage est une technique de préservation qui ajoute de la valeur au produit, mais un mauvais contrôle des paramètres, comme la température, peut nuire à sa qualité. Pour optimiser cette méthode, des études sur la cinétique de séchage de la coriandre ont été menées en utilisant différentes techniques, telles que le séchage à l'étuve et le séchage à la microonde ainsi qu'un prétraitement par ultrasons, afin d'améliorer sa disponibilité et sa qualité tout au long de l'année (**Ghedira et Goetz, 2015**).

Le présent travail s'est fixé comme objectif principal, l'application des ultrasons comme prétraitement avant le séchage par micro-ondes de la coriandre, l'influence des ultrasons sur les cinétiques de séchage, le temps de séchage et sur les substances bioactives de la plante. Les cinétiques de séchage ont été étudiées en appliquant divers modèles mathématiques.

En plus, L'accent a été mis sur la recherche de l'activité antimicrobienne et anti-inflammatoire de l'huile essentielle des graines de coriandre compte tenu de la valeur accordée au potentiel médicinal des plantes algériennes et de la tendance actuelle à trouver des alternatives aux médicaments antibactériens de synthèse contre lesquels la résistance ne cesse de croître.

Le manuscrit est introduit par une synthèse bibliographique qui constitue la première partie de cette thèse. Cette section offre une analyse approfondie et rassemble une quantité substantielle de données sur *Coriandrum sativum* L., en explorant ses aspects botaniques, biochimiques et ses applications. En complément, elle propose une vue d'ensemble des techniques de séchage appliquées à cette plante, en détaillant les enjeux et les méthodes courantes. Le troisième chapitre est consacré à la présentation et à la comparaison des différents modèles mathématiques utilisés pour décrire le processus de séchage, en soulignant leurs avantages et leurs limites. Enfin, la partie se clôt par un état de l'art sur les huiles essentielles extraites de la coriandre, mettant en avant leurs propriétés, leurs applications potentielles.

La deuxième partie de cette thèse est dédiée l'étude expérimentale, répartie en quatre chapitres :

Le premier chapitre de la partie pratique est consacré à l'optimisation de l'extraction des composés phénoliques totaux à partir des feuilles de coriandre. Cette étude repose sur une méthode de surface de réponse combinée à une extraction assistée par micro-ondes, permettant d'obtenir un rendement élevé en antioxydants dans des conditions spécifiques. Ces

composés extraits sont destinés à être utilisés dans les travaux développés dans les sections précédentes.

Le deuxième chapitre traite la comparaison entre deux méthodes de séchage : conventionnel (étuve) et micro-onde de la coriandre. Des cinétiques de séchage ont été réalisées en fonction de la perte de masse de la plante ainsi que des modélisations et l'évaluation de la composition phyto-chimique et l'activité antioxydante de la poudre obtenue par les deux méthodes de séchage.

Le troisième chapitre discute l'effet des ultrasons comme prétraitement combiné au séchage par microonde des tiges de coriandre en développant des modèles mathématiques pour le séchage et d'optimiser les paramètres du séchage par ultrasons afin de minimiser le temps de séchage et de diminuer l'énergie utilisés dans le séchage.

La dernière partie de la thèse consiste à évaluer l'activité antibactérienne, antifongique anti inflammatoire et la caractérisation chimique des huiles essentielles de la coriandre.

CHAPITRE I

Généralités sur la coriandre

1. Définition

Coriandrum sativum L., communément appelée coriandre, est une plante herbacée annuelle de la famille des Apiacées, prisée pour ses propriétés aromatiques. Le nom "coriandre" est dérivé du mot grec "Koris", qui signifie punaise puante, en raison de l'odeur âcre de ses feuilles vertes et de ses fruits non mûrs. Largement cultivée au Moyen-Orient, en Asie du Sud et en Amérique latine, la coriandre verte est la variété la plus répandue. Originaires du Sud de l'Europe et de la Méditerranée occidentale, cette plante polyvalente est maintenant cultivée dans le monde entier. Ses petites fleurs blanches, roses ou lavande et ses feuilles vertes en font un ajout distinctif et précieux à diverses cuisines. (Ghedira et Goetz, 2015).

Dans le domaine des pratiques culinaires, les graines de cette plante servent à rehausser les saveurs des plats, tandis que ses feuilles sont utilisées comme herbe aromatique. Il convient de noter que les goûts peuvent différer et que cette plante offre également des bienfaits pour la santé. De plus, les feuilles sont couramment utilisées comme condiment, en particulier dans les soupes. (Zohary et Hopf, 2000).

Toutes les parties de cette herbe sont recherchées pour leurs usages culinaires et médicaux. En phytothérapie, son huile essentielle est particulièrement utilisée pour traiter les troubles digestifs. La coriandre présente de nombreuses activités : antimicrobienne, antioxydante, antidiabétique, anxiolytique, antiépileptique, antidépresseur, antimutagène, anti-inflammatoire, antidyslipidémique, antihypertensive, neuroprotectrice et diurétique. Elle possède des propriétés à la fois nutritionnelles et thérapeutiques. Cette plante est couramment utilisée dans la préparation de divers remèdes maison pour soulager les rhumes, les fièvres saisonnières, les nausées, les vomissements et les troubles gastriques. Elle s'avère également efficace contre l'indigestion, les vers, les rhumatismes et les douleurs articulaires. De plus, la coriandre est riche en lipides, et ses feuilles contiennent une quantité significative de vitamine A. Elle aide à combattre les infections bactériennes et virales affectant l'appareil respiratoire, et est également utilisée pour traiter les infections urinaires ainsi que les problèmes d'asthénie et d'insomnie. (Sahib et al., 2012).

2. 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.



Figure 1 : Chromolithographie représentant *Coriandrum sativum* L.

❖ **Synonymes** : Cilantro, Dhania, persil chinois, Coriandri Fructus, Dhanyaka, Koriander, Kustumburi, Persil Arabe, persil mexicain, كزبرة , lkesber.

3. Botanique, origine et culture de la coriandre

La coriandre appartient à la famille des Apiaceae et au genre *Coriandrum*. On connaît seulement deux espèces de cette plante : *C. sativum* et son proche sauvage, *C. tordylium*. Sa hauteur peut varier de 20 à 140 cm, selon les conditions agro-climatiques. Les feuilles sont ovales et légèrement lobées, tandis que les sections des feuilles supérieures sont linéaires et plus découpées. Les fruits, qui comprennent les graines et le péricarpe, constituent les parties les plus utilisées de la coriandre, avec l'huile essentielle et l'huile grasse étant les plus importantes. La coriandre est originaire d'Italie, elle est actuellement cultivée 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 développe le mieux entre octobre et

février. La floraison se produit entre juin et juillet. À un stade précoce de sa croissance, la plante nécessite un climat frais, tandis qu'elle requiert des températures plus chaudes à des stades de maturité ultérieurs (Sahib *et al.*, 2013). Elle est actuellement cultivée 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 développe particulièrement bien entre octobre et février. Sa floraison se produit entre juin et juillet. À un stade précoce de sa croissance, elle requiert un climat frais, tandis qu'elle a besoin de chaleur à mesure qu'elle atteint sa maturité (Sahib *et al.*, 2013).



Figure 2: Différentes parties de l'espèce végétale *Coriandrum sativum* L. (Filliat, 2012).

3.1. Répartition géographique

La coriandre, originaire du sud de l'Europe et de la région occidentale de la Méditerranée, est une herbe largement utilisée et cultivée à travers le monde. Elle est particulièrement répandue en Inde, en Russie, en Europe centrale, ainsi qu'au Maroc, en Hongrie, en Roumanie, en Bulgarie, en Turquie et en Italie, qui figurent parmi les principaux pays exportateurs (Singh *et al.*, 2015 ; Filliat, 2012).

3.2. Antioxydants de la coriandre

La coriandre contient plusieurs composés antioxydants (Bajpai *et al.*, 2005 Wangenstein *et al.*, 2004), principalement des acides phénoliques, mais aussi des terpénoïdes, des coumarines, des flavonoïdes (dans les fruits), et des caroténoïdes dans les feuilles.

3.2.1. Polyphénols

Les polyphénols sont des molécules aromatiques synthétisées par les végétaux et qui appartiennent à leur métabolisme secondaire. Ils participent à la défense des plantes contre les

agressions environnementales, responsables des teintes automnales des feuilles et des couleurs des fleurs et fruits. Ils sont associés à de nombreux processus physiologiques tels que la croissance cellulaire, différenciation, organogenèse, dormance des bourgeons, floraison, tubérisation, etc (UNUP 1986). Ces composés jouent aussi un rôle important dans la qualité alimentaire des fruits et déterminent aussi leurs saveurs (**Sahib et al., 2013**).

3.2.2. Flavonoïdes

Ont des couleurs allant du jaune clair au jaune or. Selon les détails structuraux de leur squelette de base en C15, les flavonoïdes se divisent en 6 groupes : flavones, flavonols, flavonones, isoflavones, chalcones, aurones. Ces composés existent sous forme libre ou sous forme d'hétérosides. (**Heller, 1993**).

3.2.3. Tannins

Les macromolécules se divisent en deux groupes principaux selon leur structure. Le premier groupe est composé des tannins condensés (proanthocyanidines), qui sont des composés phénoliques hétérogènes. On les trouve sous forme d'oligomères ou de polymères de flavanes, flavan-3-ols, flavonols 5-desoxy et flavan-3,4-diols. Ces polymères possèdent une structure riche en groupes hydroxyles (OH) phénoliques, capables de former des liaisons stables avec les protéines. Le deuxième groupe est constitué des tannins hydrolysables, qui sont des esters d'acide gallique liés aux molécules de glucose. (**Singh et al., 2000**).

4. Les bienfaits thérapeutiques de la coriandre

Les propriétés fonctionnelles de la coriandre sont indéniables. Toutes les parties de cette herbe sont utilisées tant comme agent aromatisant que comme remèdes traditionnels pour traiter divers 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**).

4.1. 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**).

4.2. Activité antibactérienne

Les antimicrobiens sont des substances qui luttent contre les micro-organismes en inhibant leur croissance. L'huile de coriandre possède des propriétés antimicrobiennes à large spectre, efficaces contre certaines espèces de micro-organismes pathogènes et saprophytes, ce qui en fait un désinfectant potentiel (**Silva et al., 2012**). Un rapport indique que l'huile essentielle de coriandre est active contre plusieurs agents pathogènes, notamment *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* O:157:H7, *Yersinia enterocolitica*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Lactobacillus plantarum*, *Aspergillus niger*, *Geotrichum* et *Rhodotorula* (**Elgayyar et al., 2001**). De plus, l'huile de coriandre peut servir de conservateur alimentaire, renforçant la stabilité des produits en agissant comme antimicrobien naturel contre *Campylobacter jejuni* (**Rattanachaikunsopon et al., 2010**). Les terpènes présents dans le feuillage de la coriandre montrent également une activité antibactérienne contre *Salmonella choleraesuis* spp. *choleraesuis* ATCC 35640 (**Isao et al., 2004**). Par ailleurs, l'huile essentielle de coriandre et ses fractions pourraient agir comme agents antifongiques pour prévenir les infections à levures causées par *Candida* (**Begnami et al., 2010**). Le potentiel antimicrobien des décoctions aqueuses de *Coriandrum sativum* a été confirmé contre 186 isolats bactériens appartenant à 10 espèces de différents genres de bactéries Gram-positives, ainsi que 2 isolats de *Candida albicans* (**Tariq et al., 2007**). 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 kitts, 2006**). D'autres composés aliphatiques extraits des feuilles ont également montrés des propriétés bactéricides contre *Salmonella choleraesuis*, en partie parce qu'ils 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 méthicilline* résistant, avec une bonne tolérance cutanée. (**Ghedira et Goetz, 2015**).

4.3. Activité antidiabétique

La décoction de coriandre est couramment utilisée en médecine traditionnelle comme remède pour le diabète. Divers scientifiques à travers le monde ont rapporté que la coriandre présente des activités similaires à celles de l'insuline. Une étude menée sur des souris a démontré que l'extrait de coriandre favorisait à la fois la libération d'insuline et possédait des effets similaires à ceux de l'insuline. L'ajout d'extrait de graines de coriandre moulues au régime alimentaire a entraîné une réduction significative de la glycémie (**Deepa et**

Anuradha, 2011). De plus, la consommation d'une infusion aqueuse de coriandre a stimulé la sécrétion d'insuline de 1,3 à 5,7 fois, confirmant ainsi son activité antihyperglycémique..

Les graines de coriandre contiennent des composés susceptibles de stimuler la sécrétion d'insuline et d'augmenter l'entrée du glucose dans les cellules. Cependant, des études cliniques contrôlées sont nécessaires pour confirmer si cet effet se produit également chez l'humain. (**Momin et al., 2012 ; Ghedira et Goetz, 2015**).

4.4. Effet abaissement du cholestérol

Dans une étude menée sur des rats femelles, les graines de *Coriandrum sativum L.* ont montré un effet hypolipidémique significatif, entraînant une diminution des taux de cholestérol total et de triglycérides, ainsi qu'une augmentation des niveaux de lipoprotéines de haute densité (**Chithra et Leelamma, 1997**). Cet effet est probablement dû à une hausse de la synthèse de bile par le foie et à une dégradation accrue du cholestérol en d'autres composés. L'augmentation de la synthèse des acides biliaires hépatiques et la conversion du cholestérol en acides biliaires et en stérols neutres expliquent les effets hypolipidémiques du coriandre. Dans une autre étude, une réduction des peroxydes lipidiques ainsi qu'une augmentation de l'activité des enzymes antioxydantes ont été observées dans le foie et le cœur des animaux expérimentaux (**Chithra et Leelamma, 1999**). Une consommation régulière d'extraits de coriandre pourrait diminuer le risque de cancers du côlon et de tumeurs intestinales en prévenant la formation de radicaux libres (**Chithra et Leelamma, 2000**). De plus, l'intégration d'extraits de coriandre dans l'alimentation entraîne une augmentation significative des sécrétions d'acide biliaire et régule la bile (**Platel et al., 2002**).

4.4. Activité diurétique et effet hypotenseur

L'effet diurétique de l'extrait de coriandre est bien documenté dans la littérature, notamment par **Jabeen et al. (2009)** sur des rats Wistar comparé à un diurétique standard, le furosémide, l'extrait de coriandre a montré des effets diurétiques similaires, se traduisant par une augmentation significative du débit urinaire chez les rats. Cela souligne le potentiel des extraits de coriandre dans le traitement de l'hypertension. Des effets diurétiques marqués, tels que l'excrétion d'électrolytes et une amélioration de la vitesse de filtration glomérulaire, ont été observés chez les rats perfusés avec des extraits aqueux de graines de coriandre. De plus, une autre étude réalisée sur des lapins a révélé une inhibition des contractions électriques des bandes spiralées et des segments tubulaires de l'artère auriculaire centrale isolée. (**Medhin et al., 1986**).

4.5. Anti-cancer

L'effet biochimique des graines de coriandre sur les paramètres lipidiques du cancer du côlon induit par la 1, 2-diméthylhydrazine (DMH) chez les rats a été analysé. Les résultats indiquent que les concentrations de cholestérol et le rapport cholestérol/phospholipides ont diminué, tandis que les phospholipides ont augmenté de manière significative dans le groupe témoin traité avec le DMH par rapport au groupe ayant reçu l'épice. De plus, le poids sec des fèces, ainsi que les stérols neutres fécaux et les acides biliaires, ont montré une augmentation notable dans le groupe alimenté avec de la coriandre par rapport à celui traité au DMH. Par conséquent, la coriandre semble exercer un effet protecteur contre les altérations du métabolisme lipidique associées au cancer du côlon expérimental. Cet effet pourrait être considéré comme l'un des mécanismes par lesquels la coriandre pourrait inhiber la tumorigenèse colique (**Chithra et Leelamma, 2000**).

Chapitre II

Généralités sur le séchage

1. Introduction

Le séchage est une opération visant à réduire le taux d'humidité d'un aliment (**Ding et al., 2012 ; Jelled et al., 2015**). C'est la méthode de conservation la plus courante en agriculture pour les fruits et légumes (**Alibas, 2014**).

Ce processus implique l'évaporation de l'eau et des composés volatils, ce qui diminue la croissance des micro-organismes et limite les réactions chimiques indésirables, augmentant ainsi la durée de vie du produit. Le séchage permet d'obtenir un produit sec et homogène (**Verdier et al., 2016**), réduisant considérablement la masse et le volume des aliments, ce qui facilite leur transport, stockage et manutention (**Djerroud et al., 2010**).

Cependant, le séchage peut entraîner des dommages thermiques et provoquer d'importantes modifications des propriétés physiques, chimiques et organoleptiques des plantes aromatiques. Par conséquent, le choix de la méthode de séchage est crucial. Ce processus repose sur deux phénomènes : le transfert de chaleur vers la matrice pour favoriser l'évaporation de l'eau, et le transfert de matière (principalement 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**).

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 (P₀) dans les mêmes conditions (la température) (**Kerdudo, 2014**).

$$A_w = P/P_0 \quad (1)$$

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 et al., 2015**).

3. Principe et objectif du séchage

3.1. Principe

Le séchage est une opération visant à retirer une partie du solvant, le plus souvent de l'eau, d'un corps par vaporisation. Le produit final, qualifié de « sec », est obtenu sous une forme solide de taille variable. Cette opération constitue une séparation thermique, car elle nécessite la fourniture de l'énergie de vaporisation du solvant pour permettre sa séparation du produit sous forme de vapeur. (Vasseur, 2009).

3.2. Objectif

L'objectif principal du séchage est de transformer des denrées périssables en produits stables en réduisant l'activité de l'eau (a_w). Cela vise à interdire ou à minimiser toute détérioration microbienne, biochimique et chimique (Alibas, 2007). En plus de cet objectif, le séchage permet (Bonazzi et Bimbenet, 2003) :

- D'augmenter la durée de conservation des produits alimentaires ainsi que leurs qualités organoleptiques ;
- De réduire la masse et le volume des produits pour faciliter leur transport, leur stockage et leur manutention ;
- D'apporter une structure, une présentation ou une fonctionnalité particulière aux produits ;
- De stabiliser les produits agricoles et d'atténuer les effets de certaines activités.

3.3. 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).

3.3.1. Techniques de séchage et modes d'apport de chaleur

La diversité des matériaux à sécher, qu'ils varient en nature, taille ou forme, ainsi que les exigences spécifiques de traitement à respecter (contraintes physico-chimiques ou biologiques), expliquent la grande variété de techniques existantes (Zidani, 2009). Parmi les principales méthodes de séchage décrites dans la littérature, on trouve la lyophilisation, le séchage au soleil, le séchage par ultrasons et le séchage par micro-ondes. (Nowacka, Wiktor et al., 2012 ; Calvache, et al. 2015 ; Sallam et al., 2015 ; Warning 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 et al., 2015**).
- **Le séchage par rayonnement** : l'énergie est apportée par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques (**Wang 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**).

3.3.2. Transferts de matière

Le séchage se différencie des autres méthodes de déshydratation en ce sens que l'eau est retirée du produit uniquement par évaporation. Ce processus s'appuie sur le gradient de pression partielle de vapeur d'eau entre la surface du produit et l'environnement extérieur (**Allaf et al., 2012**). Par ailleurs, l'environnement extérieur doit fournir un débit de chaleur adéquat pour faciliter la vaporisation de l'eau. (**Bonazzi and Bimbenet, 2003**).

4. Technologies de séchage

4.1. Au soleil

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 et une hygrométrie peu élevée. Le séchage s'effectue à même le sol, sur des nattes, sur des rochers plats ou bien sur les toits des maisons. Ce système présente deux principaux avantages pour les communautés : peu de travail et pas d'investissement. Mais, très souvent, les résultats obtenus sont médiocres car les produits sont souillés de sable et de poussière. Ils subissent les attaques des animaux, des insectes et des micro-organismes. Les pertes sont ainsi importantes. De plus, les produits s'abîment, sèchent trop ou pas assez, ce qui dégrade fortement leur qualité (**Dudez et al., 1996**).

Certains scientifiques travaillent sur des méthodes de prétraitement (**Doymaz, 2004**) ou la modélisation du séchage (**Toğrul et Pehlivan, 2004 ; Tunde-Akintunde, 2011**) pour améliorer la qualité des produits. En raison des inconvénients décrits ci-dessus, l'utilisation de séchoirs solaires s'est développée pour remplacer le séchage au soleil.

4.2. Séchage à l'air chaud

Au-delà de l'utilisation de l'énergie solaire pour le séchage, diverses technologies de déshydratation ont été développées au début du XXe siècle. Elles sont basées sur l'utilisation d'une source de chaleur artificielle. Le terme « déshydratation » a été donné aux méthodes de séchage dans des conditions contrôlées. Le premier procédé de séchage artificiel connu des aliments est apparu au XVIIIe siècle. Des légumes traités dans l'eau chaude ont ensuite été placés dans un four chaud pour le séchage (**Ratti, 2009**).

Aujourd'hui, la méthode prédominante de déshydratation de la plupart des fruits et légumes est le séchage à l'air chaud, qui est la plus simple et la plus rentable. Les différents types de séchoirs qui ont été conçus, construits et utilisés reposent tous sur ce principe de fonctionnement. Dans ce processus, de l'air chauffé est utilisé pour améliorer le transfert de chaleur et de masse, lorsque le matériau humide (humide) doit être séché. Les transferts sont principalement par convection interne. Le transfert de masse englobe deux éléments principaux: le déplacement de l'eau vers la surface du produit et l'élimination de l'humidité sous forme de vapeur de la surface du produit. Les principes de base, les différentes méthodes de séchage et les différents types de séchoirs à air chaud ont été résumés par de nombreux auteurs dans des articles de synthèse et des monographies. (**Chakraverty, 2003 ; Mujumdar, 2006**).

Afin d'obtenir des produits déshydratés de haute qualité à un prix raisonnable, la déshydratation doit être suffisamment rapide. Les quatre principaux facteurs qui ont affecté la vitesse et le temps de séchage sont les suivants: les caractéristiques physiques de l'aliment, principalement la taille et la forme des particules, la structure interne et la surface, l'orientation du produit par rapport au flux d'air (flux transversal, passage, chargement du plateau, etc.), les conditions de l'air (température, humidité, vitesse) et les caractéristiques de conception du séchoir (flux croisé, co-courant, contre-courant, lit fluidisé, pneumatique, etc.). La méthode à choisir dans le processus de séchage de l'article du produit alimentaire est déterminée par les facteurs de qualité du produit, la matière première utilisée et bien sûr les facteurs économiques. Les principaux séchoirs utilisés pour le séchage

discontinu des fruits et légumes en dés comprennent la boîte chaude, le séchoir à four à air chaud, le séchoir tunnel, le séchoir cyclone ou le séchoir celluller, le séchoir pneumatique et la courroie de séchoir. Parmi ceux-ci, la boîte chaude et le séchoir celluller sont des processus discontinus, le séchoir à bande est un processus continu et le séchoir tunnel est un processus semi-continu. (**Jayaraman et Das Gupta, 2006**).

❖ **Avantages**

Le processus opératoire est simple alors que l'équipement est généralement simple et à coût peu élevé.

❖ **Inconvénients**

Lors de cette opération, il est possible qu'il y ait une importante diminution du produit (surtout au début) ainsi qu'une notable perte de sa qualité nutritionnelle (à la fin en raison d'un temps de séchage généralement long). (**Ratti, 2009**).

4.3. Séchage non conventionnel (micro-ondes)

Le séchage par microondes appartient au type de séchage par ébullition et obéit à un transfert de chaleur par rayonnement. Ce rayonnement, issu des ondes électromagnétiques, a une fréquence qui se situe entre celle de la lumière infrarouge et celle des ondes de télévision (Figure 1). Sa longueur d'onde est comprise entre 1 mm et 1 m, et sa fréquence varie de 300 Mhz à 300 Ghz, en utilisant comme énergie primaire, l'électricité (**Rougier, 2003**).

4.3.1. Définition des micro-ondes

Les micro-ondes, ou hyperfréquences, sont constituées d'un champ électrique et d'un champ magnétique. Ces ondes électromagnétiques ne présentent aucun effet néfaste sur la santé humaine car elles ne sont pas ionisantes. Les fréquences des micro-ondes se trouvent entre 300 MHz et 300 GHz, ce qui équivaut à des longueurs d'onde allant de 1 millimètre à 1 mètre (**figure 03**). La fréquence de 2450 MHz est la plus couramment utilisée, correspondant à la majorité des magnétrons présents dans les fours micro-ondes de cuisine d'une puissance comprise entre 600 et 1000 Watts. Cette fréquence a une longueur d'onde dans l'air équivalente à environ 12,2 cm (**Chandrasekaran et al., 2013**).

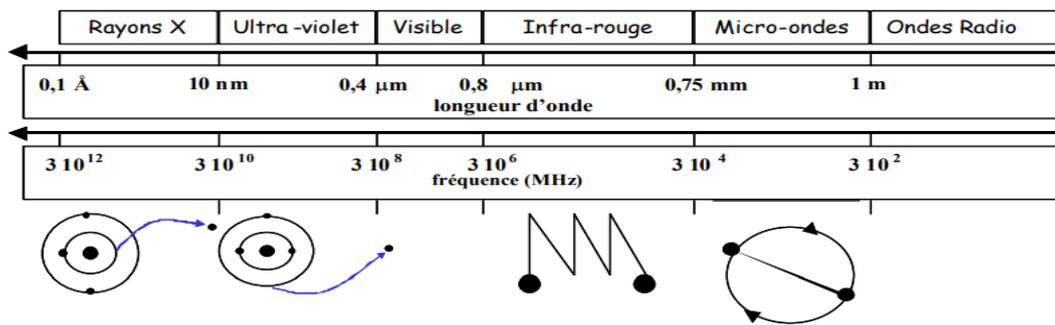


Figure 3: Le spectre électromagnétique (Chemat, 2015).

4.3.2. Principe

Le phénomène fondamental responsable du chauffage microondes (appelé aussi chauffage par hystérésis diélectrique) est la dégradation par dissipation d'une partie de l'énergie transportée par l'onde électromagnétique. Un matériau diélectrique est un isolant donc un mauvais conducteur d'électricité. Il s'échauffe du fait de la polarisation et de la rotation de ses dipôles. Puis de leur relaxation lorsqu'ils sont soumis à des champs électriques alternatifs. Le dégagement de chaleur résultant diffère fondamentalement du chauffage par effet Joule qui est provoqué par des frictions internes entre les électrons et les molécules. De plus, contrairement au chauffage classique, il a lieu dans le volume, d'où son appellation de chauffage volumique (Singh et Heldman, 2001).

4.3.3. Mécanisme de chauffage par micro-ondes

Les méthodes de séchage classiques sont totalement différentes du mécanisme de séchage par micro-ondes. Quand la température à l'intérieur du matériau se rapproche de celle à laquelle l'eau bout, cela entraîne une augmentation significative de la pression. Cela entraîne l'humidité à se déplacer de l'intérieur vers la surface, ce qui provoque un écoulement selon la loi de Darcy. En général, cela entraîne un niveau d'humidité de surface considérablement plus élevé que celui causé par la diffusion seule. Étant donné que l'air dans la cavité du four est plus froid que les parties internes de la particule, cela diminue la capacité d'élimination de l'humidité à partir de sa surface et favorise plutôt son accumulation à proximité. Lorsque le matériau est extrêmement humide, il se produit des pressions significatives qui permettent de faire remonter l'eau à la surface. Cela peut entraîner une augmentation significative du taux d'humidité. (Datta et Davidson, 2000). Le gradient de pression est l'effet majeur sur le

transport de l'humidité dans le séchage par micro-ondes. Il y a deux mécanismes responsables du réchauffement des aliments par les micro-ondes.

➤ **Rotation dipolaire**

Les molécules d'eau se forment par la liaison de deux atomes d'hydrogène à un atome d'oxygène. Chaque atome d'hydrogène est composé d'une charge positive tandis que l'atome d'oxygène se compose de deux charges négatives. On appelle dipôles les charges qui sont physiquement séparées. Si on place ces molécules d'eau dans une région où il y a un champ électrique oscillant, elles vont être soumises à un couple ou à une force de rotation qui va essayer de les aligner avec la direction du champ (**Buffler, 1993**). Avant l'application du champ électrique micro-ondes, les molécules d'eau contenues dans l'aliment sont chauffées de manière aléatoire par agitation thermique à la température initiale de l'échantillon. Quand le champ est mis en action, les molécules cherchent à s'aligner avec la direction du champ initial et entrent en collision de manière aléatoire avec les autres molécules environnantes. Une fois que le champ électrique s'inverse, ils essaient de changer la direction et cela entraîne d'autres collisions (**figure 04**). Donc, c'est le champ électrique qui permet aux molécules d'eau de s'aligner en rotation (**Khraisheh et al. , 1997**). On appelle ce phénomène de base pour le chauffage des aliments aux fréquences micro-ondes la rotation dipolaire.

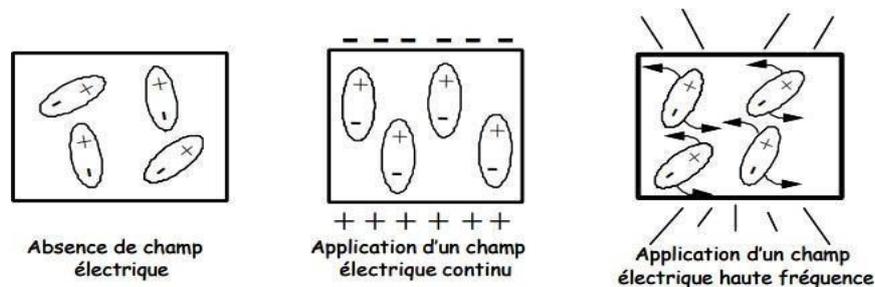


Figure 4: Frissonnement des dipôles soumis à une irradiation micro- ondes.

➤ **Interaction ionique**

Toute particule chargée trouvée dans le four subit une force alternant dans les trois directions orthogonales (de haut en bas, de gauche à droite et d'avant en arrière) à 2,45 milliards de fois par seconde. La force nette due aux trois champs sera dans une direction arbitraire dans l'espace, en fonction de l'amplitude des trois forces individuelles. La force nette va d'abord accélérer la particule dans une direction et ensuite dans l'opposé, avec des particules de charges opposées étant accélérées dans des directions opposées.

4.3.4. Avantages et inconvénients du séchage par micro-ondes

Les produits ayant une teneur en eau inférieure à 20% peuvent être séchés de manière très efficace grâce aux micro-ondes. **Maskan (2001)**, propose une alternative pour améliorer la qualité des produits déshydratés. On peut utiliser les micro-ondes seules ou en combinaison avec d'autres méthodes de séchage conventionnelles. Le dernier cas s'applique principalement pour des raisons économiques, lorsque l'aliment contient une faible teneur en eau à la dernière phase de séchage. En effet, le séchage conventionnel est alors très lent et prend beaucoup de temps (**Maskan, 2001**).

Le séchage aux micro-ondes permet non seulement de réduire considérablement le temps nécessaire pour sécher, mais présente également l'avantage d'assurer un chauffage sélectif du composant aqueux en raison de son activité diélectrique plus élevée par rapport aux autres composants solides (**Ahmad et al., 2001**). Néanmoins, son inconvénient réside dans sa distribution non uniforme à l'intérieur de la cavité de traitement, ce qui entraîne des problèmes de chauffage irrégulier (**Drouzas et al., 1999**). La **figure 05**, représente la différence de Transferts thermiques sous les deux modes de chauffage.

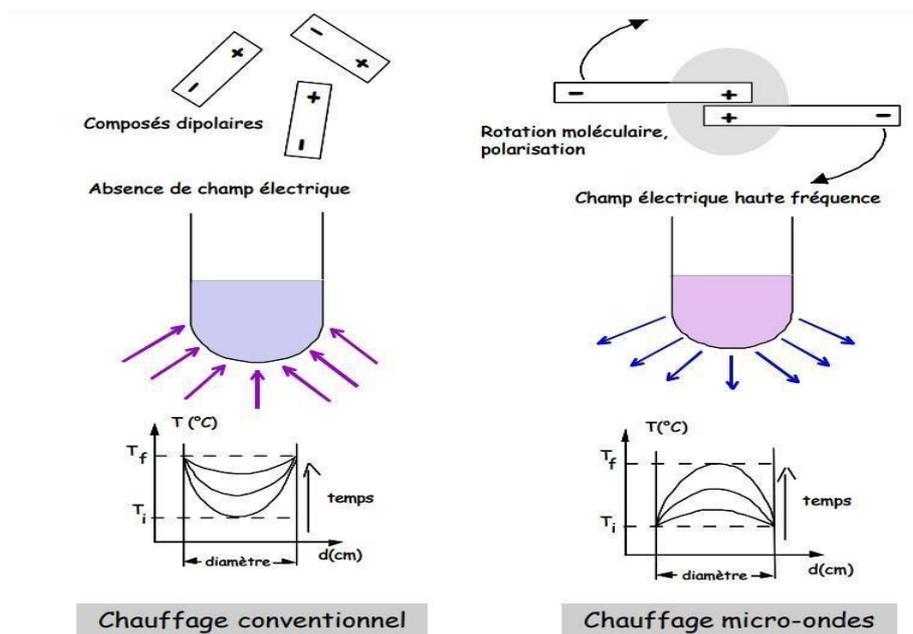


Figure 5: Transferts thermiques sous les deux modes de chauffage (**Chemat, 2015**).

5. Prétraitement par ultrasons

Les ultrasons sont définis comme des ondes sonores dont la fréquence dépasse la limite d'audition de l'oreille humaine (~20 kHz). Certains animaux utilisent les ultrasons pour la navigation (dauphins) ou la chasse (chauves-souris) en utilisant les informations transportées par les ondes sonores rétrodiffusées. Les ultrasons sont l'une des technologies émergentes qui ont été développées pour minimiser le traitement, maximiser la qualité et garantir la sécurité des produits alimentaires. Les ultrasons sont appliqués pour conférer des effets positifs dans le traitement des aliments, tels que l'amélioration du transfert de masse, la conservation des aliments, l'assistance des traitements thermiques, la manipulation de la texture et l'analyse des aliments (**Knorr *et al.*, 2011**).

5.1. La physique des ultrasons

Les ondes acoustiques, lorsqu'elles vibrent à des fréquences inaudibles pour l'homme (18-500 kHz) dans des matériaux contenant de l'eau, provoquent une compression et une expansion du matériau, un phénomène appelé « effet éponge ». Ce processus entraîne la formation de microcanaux dans les cellules et permet au liquide intracellulaire de s'échapper. En parallèle, l'application d'ultrasons dans des liquides peut entraîner un phénomène de cavitation, où l'implosion des bulles génère des variations rapides et extrêmes de pression et de température, causant ainsi des dommages cellulaires. Les effets produits par les ultrasons dépendent des paramètres et de la méthode d'application (sonication pulsée ou continue), comme la durée des impulsions, l'intensité, la fréquence et le nombre d'impulsions. Ces variables permettent d'obtenir différents résultats, tels que des effets thermiques, de cavitation, ou une combinaison des deux. L'impact des ultrasons sur les aliments n'est pas toujours directement proportionnel aux paramètres appliqués, comme l'intensité, et des phénomènes inattendus peuvent survenir, tels que la cavitation dans des matériaux sans gaz détecté. De plus, les ondes acoustiques peuvent induire la dénaturation des protéines, réduisant ainsi l'activité enzymatique, mais des impulsions ultrasonores courtes peuvent parfois augmenter cette activité en fragmentant les structures moléculaires, facilitant l'accès des enzymes à leurs substrats (**Knorr *et al.*, 2004 ; Fernandes et Rodrigues, 2007**).

5.2. Les ultrasons dans l'industrie alimentaire

Au cours des dernières années, les ultrasons (US) dans le domaine de l'alimentation ont été étudiés et développés. Les industries sont très intéressées par les ultrasons car elles peuvent bénéficier d'un équipement ultrasonore pratique et fiable. De nos jours, son apparition en tant que nouvelle technologie écologique a également suscité l'intérêt pour son rôle dans la préservation de l'environnement. (**Mason *et al.*, 2011**).

❖ Séchage assisté par ultrasons

Depuis longtemps, le séchage assisté par ultrasons suscite de l'intérêt. Les techniques classiques de déshydratation ou de déshydratation des aliments par un flux d'air chaud forcé sont économiquement raisonnables, mais l'élimination de l'humidité intérieure nécessite un temps assez long. De plus, les hautes températures peuvent causer des dégâts aux aliments, ce qui peut, dans certains cas, altérer la couleur, le goût et la valeur nutritionnelle du produit réhydraté (**Fernandez et Rodriguez, 2008**). Ces inconvénients peuvent être éliminés par des méthodes alternatives, mais certaines, telles que la lyophilisation, sont onéreuses et d'autres, comme le séchage par pulvérisation, ne sont utilisables que pour les liquides. Toutefois, il est connu que l'utilisation d'énergie vibratoire peut favoriser la déshydratation et prévenir ces désavantages. La dispersion à la limite d'un solide suspendu (**Gallego- Juárez *et al.*, 1998**). Selon **Zhang *et al.* (2006)**, la chaleur peut altérer la qualité du produit final en entraînant une saveur et une couleur désagréables des aliments, une détérioration des vitamines et une diminution des acides aminés essentiels. La déshydratation par ultrasons présente de grandes perspectives car elle peut être employée à des températures basses, ce qui prévient la détérioration des aliments à des températures élevées. Selon Gallego-Juárez *et al.* (1998), les ultrasons de puissance contribuent également à améliorer les phénomènes de transfert de chaleur et de masse lors des processus de séchage.

La déshydratation acoustique repose sur la cavitation (**Tarleton et Wakeman, 1998**) et également sur les effets des compressions et des expansions induites par les ondes sonores traversant le milieu alimentaire, ce qui génère des forces élevées et maintient l'humidité à l'intérieur des capillaires du matériau, facilitant ainsi l'élimination de l'humidité (**De la Fuente *et al.*, 2006**).

L'effet du prétraitement par ultrasons avant le séchage à l'air sur la déshydratation des bananes (**Fernandes et Rodrigues, 2007**), des melons (**Fernandes *et al.*, 2008a**), des ananas (**Fernandes *et al.*, 2008b**), de papaye (**Fernandes *et al.*, 2008**), de sapotas (**Falade &**

Igbeka, 2007), de pomme malaise (**Oliveira et al., 2011**) et de carotte (**Cárcel et al., 2011**). En général, la diffusivité effective de l'eau dans le fruit a augmenté après l'application d'ultrasons, ce qui a réduit le temps de séchage à l'air (**Fernandes & Rodrigues, 2008**).

Chapitre III

Modélisation mathématique pour les techniques de séchage

1. Introduction

Le séchage est une opération complexe combinant simultanément des transferts de chaleur et de masse, ainsi que des transformations physiques ou chimiques qui peuvent altérer la qualité des produits. Parmi les changements physiques possibles figurent les modifications géométriques telles que le retrait, le gonflement, la cristallisation ou les transitions vitreuses. En outre, des réactions chimiques ou biochimiques, désirées ou non, peuvent se produire, entraînant des variations de couleur, de texture, d'odeur, ou d'autres propriétés du produit solide. Par exemple, dans la production de catalyseurs, les conditions de séchage peuvent avoir un impact significatif sur l'activité du catalyseur en modifiant la surface interne disponible (**Boekel et Tijeskens, 2001**).

Le séchage résulte de la vaporisation de l'eau initialement à l'état liquide, en fournissant de la chaleur au produit initialement humide. Comme indiqué plus haut, la chaleur peut être fournie par convection (séchoirs directs), par conduction (séchoirs contacts ou séchoirs indirects), par rayonnement. Le transport de l'humidité à l'intérieur du solide peut se produire par l'un ou plusieurs des mécanismes suivants de transfert de masse (**Mujumdar, 2006**).

- La diffusion du liquide, si le solide humide est à une température inférieure au point d'ébullition du liquide.
- La diffusion de vapeur, si le liquide se vaporise à l'intérieur du matériel.
- La diffusion de Knudsen, si le séchage s'effectue aux températures et aux pressions très basses, par exemple, dans le procédé de lyophilisation.
- La diffusion de surface (possible mais non prouvée).
- Les différences de pression hydrostatique, lorsque les taux de vaporisation interne ne dépassent pas le taux de transport de vapeur à travers le solide à l'environnement et que le gradient de la pression totale intervient comme force motrice du transfert de la matière (comparable au transfert de Darcy).
- Une ou plusieurs des combinaisons des mécanismes ci-dessus.

La modélisation de la cinétique des paramètres de processus est très bénéfique dans le contexte des processus alimentaires. Ces changements évoluent à un rythme défini et avec une cinétique spécifique. La modélisation de la cinétique de ces processus ou paramètres nous permet de décrire quantitativement ces changements et de spécifier leurs vitesses. En substance, nous possédons un outil puissant qui peut aider à démêler les mécanismes de réaction fondamentaux. Un cadre d'étude perspicace à cet égard est la modélisation des

mécanismes, qui met l'accent sur la nature critique de la compréhension des mécanismes de base de la modélisation et du contrôle de la qualité (**Boekel et Tijeskens, 2001**).

Pour comprendre comment se produisent les réactions, la température et la cinétique doivent être connues. La vitesse à laquelle une réaction se produit est ce qui suit de cette force motrice de la réaction et de la résistance au changement. Par conséquent, la thermodynamique et la cinétique sont étroitement liées. Cela signifie donc que la connaissance de la cinétique de séchage permettra d'identifier des méthodes de séchage appropriées et facilitera le contrôle des processus de séchage. La cinétique est également importante pour le génie des procédés et l'ingénierie, car il peut être coûteux et fastidieux d'effectuer une expérience à grande échelle pour déterminer les conditions de séchage appropriées. Par conséquent, la cinétique du séchage est utilisée pour exprimer le processus d'évaporation de l'humidité et la relation entre les variables du processus (**Gupta et Patil, 2014**).

La modélisation du séchage des matériaux en particules ou en couches minces est nécessaire pour connaître le transport fondamental des matériaux, ce qui est une condition préalable pour la simulation ou la mise à l'échelle du processus complet pour ensuite optimiser ou contrôler les conditions de travail. Des modèles simples avec une signification physique raisonnable sont assez efficaces pour les objectifs d'ingénierie. La modélisation mathématique du processus de déshydratation est une partie inévitable de la conception, le développement et l'optimisation d'un séchoir (**Vagenas et Marinou, 1991**).

De nombreux modèles de transfert simultané de chaleur et de masse ont été développés pour le séchage. Ils sont soit basés sur le transfert d'humidité pour une diffusivité effective soit sur la séparation de la diffusion liquide et la diffusion basée sur la vapeur (**Srikiatden et Roberts, 2007**).

2. Théorie diffusionnelle

Ce modèle est régi par l'équation de diffusion. Le premier auteur à avoir proposé son utilisation est Lewis. Sherwood et ses collaborateurs ont mis en œuvre cette idée et ont obtenu des solutions à l'équation de diffusion en excellent accord avec les données expérimentales. Sherwood a constaté que le comportement des principaux paramètres du modèle est complexe et qu'il est difficile de prévoir la décroissance de la diffusion en fonction de la concentration en eau. (**Remache et Belhamri, 2008**).

La diffusion se produit au sein de la structure fine du solide, ainsi que dans les capillaires, les pores et les petites cavités saturées de vapeur d'eau. Cette vapeur se propage vers l'extérieur jusqu'à ce qu'elle soit entraînée dans le flux d'air à l'extrémité ouverte d'un tube capillaire. Malheureusement, la théorie de la diffusion ne considère pas le retrait, le durcissement, ni les phénomènes de sorption/désorption isotherme (**Gustavo et Humberto, 1996**).

La théorie diffusionnelle s'applique à des produits de structure continue (**Chareau et Cavailé, 1995**).

Cette théorie postule que le déplacement de l'eau vers la surface du solide est régi par la loi de Fick, qui décrit le phénomène de migration de la vapeur d'eau d'une zone à forte concentration en eau vers une zone à faible concentration en eau, autrement dit, du centre de la matière à sécher vers sa surface. Puis l'évaporation de l'eau à la surface du produit résulte d'un apport énergétique extérieur.

La migration de l'eau par diffusion est proportionnelle au gradient de concentration en eau :

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \bar{V}(D_{eff} \bar{V}W) \quad (2)$$

Où W : Teneur en eau (% db)

:

D_{eff} : Coefficient de diffusion ($m^2 s^{-1}$) t : Temps (s)

La dépendance à la température du coefficient de diffusion effective, D_{eff} , peut être décrite par l'équation Arrhenius (**Gustavo et Humberto, 1996**) :

$$D_{eff} = D_o \exp\left(-\frac{E_a}{R_g T}\right) \quad (3)$$

Où:

E_a : Énergie d'activation ($J mol^{-1}$) T : Température absolue ($^{\circ}K$)

D_o : Coefficient de diffusion de référence ($m^2 s^{-1}$)

R_g : Constante universelle des gaz parfaits ($J mol^{-1} K^{-1}$).

3. Théorie capillaire

L'écoulement capillaire est le mouvement du liquide à travers les capillaires, les pores d'interconnexion dans un solide, ou sur la surface du solide par l'attraction moléculaire entre le

liquide et le solide (Srikiatden et Roberts, 2007). Ceaglske et Hougen (1937), privilégient la théorie de la capillarité comme principal mécanisme de migration de l'eau lors du séchage de matériaux granulaires. Dans cette théorie, le flux d'humidité dépend des forces capillaires plutôt que d'un gradient de concentration en humidité. Le flux peut donc être orienté vers une augmentation de la concentration en eau.

Plusieurs chercheurs ont validé cette observation, établissant un modèle de séchage des matériaux poreux basé sur la capillarité, considérée comme le mécanisme limitant la vitesse de transfert de l'humidité au début du séchage, suivi par la diffusion de vapeur comme phénomène dominant lors des dernières étapes de séchage (Srikiatden et Roberts, 2007).

Cette théorie s'applique aux produits poreux ainsi qu'aux produits granulaires, où les espaces ou interstices entre les particules se comportent de manière analogue aux pores (Chareau et Cavallé, 1995).

Dans la théorie capillaire, la force motrice est le potentiel capillaire. Le potentiel capillaire, ou la succion, est la différence de pression entre l'eau et l'air à l'interface courbe air-eau dans un capillaire. La courbure de l'interface est induite par la tension de surface de l'eau.

$$J_c = -K_h \nabla \varphi$$

(4)

Où

J_c : Flux liquide dû à la capillarité ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

K_h : Conductivité hydraulique insaturée (m s^{-1})

φ : Potentiel capillaire ou succion (kg m^{-2})

Dans des conditions isothermes, le potentiel capillaire est proportionnel à la concentration de liquide dans le solide. Le gradient de cette concentration est alors la principale force motrice.

4. Théorie de l'évaporation-condensation

L'évaporation-condensation est un type de transfert interne de chaleur et de masse qui se produit lorsque la masse est transférée à l'état de vapeur, la chaleur étant échangée par condensation d'eau par évaporation ou par oxydation de leau. Henry (1948) a créé un modèle pour expliquer les mécanismes de transfert de chaleur impliqués dans l'évaporation de l'eau à partir d'un solide ou lorsque la vapeur d'eau se condense dans un solide. Ainsi, Le modèle de Henry est communément désigné sous le nom de modèle d'évaporation-condensation

(Srikiatden et Roberts, 2007). Les bilans d'énergie et de masse sont donnés (Bossart, 2006) ci-dessous :

❖ Diffusion de masse

$$D\nabla^2\rho_d - \frac{\partial\rho_d}{\partial t} = m_p \frac{\partial W}{\partial t} \quad (5)$$

❖ Diffusion de chaleur

$$D_{ch}\nabla^2 T - \frac{\partial T}{\partial t} = -C_T \frac{\partial W}{\partial t} \quad (6)$$

❖ Équation d'équilibre

$$\frac{\partial W}{\partial \rho_d} = a_1 \text{ et } \frac{\partial W}{\partial T} = -a_2 \quad (7)$$

La vapeur dans les pores est supposée être en équilibre avec la vapeur adsorbée sur les parois.

$$m_p = \frac{1-\psi}{\psi} \frac{\rho_{sol}}{\rho_d} \quad (8)$$

Où :

D : Coefficient de diffusion moléculaire ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

ψ : Porosité ;

D_{ch} : Coefficient de diffusion de chaleur ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

; T : Température ($^{\circ}\text{K}$) ;

C_T : Constante concernant l'augmentation de température produite lorsque le solide adsorbe l'humidité ($^{\circ}\text{K}$) ;

W : Masse de substance diffusante dans le solide (kg kg^{-1}) ;

a_1, a_2 : Constantes.

5. Théorie de la diffusion de la vapeur d'eau

Ce modèle suppose que le mécanisme prédominant de transfert interne dans le séchage est la diffusion interne de vapeur. **King. (1968)** étudie la désorption de l'eau dans les produits alimentaires poreux. Il établit un modèle mathématique basé en supposant que le transfert de

masse à l'intérieur du solide se produit principalement dans la phase vapeur. Le transfert de chaleur est considéré parallèlement au transfert de masse. À tout moment, l'humidité en phase condensée est plus grande qu'en phase vapeur et donc, le transfert d'humidité se fait par diffusion au travers de la phase vapeur. La relation entre l'humidité désorption et la pression de vapeur partielle dans la phase gazeuse est décrite par une isotherme de désorption.

L'équation exprimant la vitesse de changement du contenu en humidité d'un matériau poreux hygroscopique est, selon King, de la forme (Bossart, 2006) :

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{eff} \frac{\partial W}{\partial x} \right)$$

(9)

$$D_{eff} = \frac{D p_{vsat}}{\rho_{sol} R T} \frac{P_T}{P_T - p_w} \left(\frac{\partial a_w}{\partial X} \right)_T \left(\frac{\alpha}{1 + \alpha} \right)$$

(10)

Où :

- W : Humidité absolue du solide (kg d'eau kg⁻¹ de solide sec)
- D_{eff} : Diffusivité effective (m² s⁻¹)
- t : Temps (s)
- x : Distance (m)
- D : Coefficient de diffusion de la vapeur d'eau (m² s⁻¹)
- p_{vsat} : Pression partielle de la vapeur d'eau à saturation (Pa)
- ρ_{sol} : Masse volumique du solide sec (kg m⁻³)
- R : Constante des gaz parfaits (J kg⁻¹ K⁻¹)
- T : Température (K)
- P_T : Pression totale (Pa)
- P_w : Pression partielle de vapeur de l'eau (Pa)
- a_w : Activité de l'eau (-)
- λ_{th} : Conductivité thermique (W m⁻¹ K⁻¹)
- q_s : Chaleur de sorption (J kg⁻¹)

6. Modèles empiriques

En général, le séchage en couche mince est utilisé pour sécher une couche de particules ou des tranches d'échantillon (Akpinar, 2006). Plusieurs chercheurs ont développé des modèles mathématiques pour décrire le phénomène de variation de la teneur en eau, du transfert de chaleur et de la masse lors du séchage. Les équations peuvent représenter des modèles théoriques, semi-théoriques ou empiriques. Le premier d'entre eux n'intègre que la

résistance interne au transfert de masse. (Parti, 1993), tandis que les autres considèrent la résistance externe au transfert de masse entre le produit et l'air (**Özdemir et Devres, 1999**). Les modèles théoriques expliquent de manière claire les comportements de séchage du produit et peuvent être appliqués dans toutes les conditions du procédé, bien qu'ils reposent sur de nombreuses hypothèses entraînant des erreurs considérables. Les modèles théoriques les plus couramment utilisés sont issus de la diffusion. De la même manière, les modèles semi-théoriques proviennent généralement de la deuxième loi de Fick et de ses adaptations simplifiées (d'autres modèles semi-théoriques sont dérivés de la loi de refroidissement de Newton). Ils sont plus simples et nécessitent moins d'hypothèses grâce à l'utilisation de certains résultats expérimentaux. D'autre part, ils ne sont valables que dans les conditions du procédé appliqué (**Parry, 1985**). Les modèles empiriques ont des caractéristiques similaires aux modèles semi-théoriques. Ils dépendent fortement des conditions expérimentales et donnent des informations limitées sur les comportements de séchage du produit (**Keey, 1972**).

6.1. Modèle de Lewis

Le modèle de Lewis est la solution générale de l'équation de Fick. Ce modèle ne considère que la diffusion basée sur la migration de l'eau. Le modèle simple de Lewis est exprimé comme suit :

$$\boxed{\frac{dW}{dt} = -k(W - W_e)} \quad (11)$$

La forme générale du modèle de Lewis prend la forme exponentielle suivante :

$$\boxed{\frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = \exp(-kt)} \quad (12)$$

Où :

k : est une constante de séchage, qui dépend de la température, l'humidité absolue et la vitesse de l'air ainsi du diamètre du produit utilisé. Ce modèle a été utilisé par **Sacilik et Elicin, (2006)** et **Doymaz (2004)**.

6.2. Modèle de Page

Page, (1949) a modifié le modèle de Lewis pour obtenir un modèle plus précis en ajoutant une constante sans dimension empirique (n) et à appliquer cette approche au séchage des graines (**Erbay et Icier, 2010**) :

$$\boxed{\frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = \exp(-kt)^n} \quad (13)$$

Où

k et **n** : sont des constantes de séchage qui dépendent de la température de l'air et de la nature du produit.

6.3. Modèle modifié de Page

Overhults et al. (1973) ont modifié le modèle de Page pour décrire la phase de séchage des graines de soja. Cette forme est généralement connue sous le nom de modèle modifié de Page I :

$$\frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = \exp(-kt)^n$$

(14)

En outre, **White et al. (1980)** ont utilisé une autre forme modifiée du modèle de Page pour décrire le séchage des fèves de soja. Cette forme est généralement connue sous le nom de modèle modifié de Page II :

$$\frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = \exp -(kt)^n$$

(15)

6.4. Modèle de Henderson et Pabis

Henderson et Pabis (1962) ont amélioré le modèle du séchage en utilisant la deuxième loi de Fick de la diffusion et en l'appliquant au séchage des grains :

$$\frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = A \cdot \exp(-kt)$$

(16)

Où :

A et **k** : sont des constantes de séchage.

6.5. Modèle logarithmique

Chandra et Singh (1994) ont proposé un nouveau modèle dérivé du modèle de Henderson et Pabis avec l'addition d'un terme empirique :

$$\frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = a \cdot \exp(-kt) + c$$

(17)

Où :

k, **a** et **c** sont des constantes de séchage qui dépendent de la température de l'air et sa vitesse.

6.6 .Modèle de Midilli

Midilli et al. (2002) ont proposé un nouveau modèle avec l'ajout d'un terme supplémentaire empirique intégrant le temps t au modèle Henderson et Pabis. Ce nouveau modèle est la combinaison d'un terme exponentiel et d'un terme linéaire. Ils ont appliqué ce nouveau modèle pour le séchage du pollen, de champignons, et de pistache pour différentes méthodes de séchage.

$$\boxed{\frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = a \cdot \exp(-kt) + b \cdot t}$$

(18)

Où :

b : est une constante empirique (s^{-1}).

6.7 .Modèle modifié de Midilli

Ghazanfari et al. (2006) ont souligné que le terme a du modèle de Midilli (**Eq. 19**), devait être 1 pour $t = 0$ et ont proposé la modification suivante :

$$\boxed{\frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = \exp(-kt) + b \cdot t}$$

(19)

Ce modèle n'a pas été appliqué à un produit alimentaire, mais a donné de bons résultats avec la fibre de lin.

6.7.1. Modèle de Demir et al.

Demir et al. (2007) a proposé un nouveau modèle qui est semblable aux modèles d'Henderson et Pabis, modifié de Page-I, logarithmique, et de Midilli :

$$\boxed{\frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = a \cdot \exp(-kt)^n + b}$$

(20)

Ce modèle vient d'être proposé et appliqué au séchage d'olives vertes et a obtenu de bons résultats.

6.7.2. Modèle à deux paramètres

Henderson (1974) a proposé d'utiliser les deux premiers termes de la série de solution générale de la deuxième loi de Fick pour corriger les lacunes du modèle Henderson et Pabis.

Le nouveau modèle s'écrit comme suit :

$$\boxed{\frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = a \cdot \exp(-kt)^n + b}$$

(21)

Où :

a, b : sont définis comme l'indication de la forme et généralement nommés tels que les constantes du modèle (sans dimension), et k_1, k_2 sont les constantes cinétiques du séchage.

Ces constantes sont obtenues à partir de données expérimentales et **(Eq.21)** est généralement connue sous la dénomination de modèle à deux paramètres.

6.7.3. Modèle exponentiel à deux paramètres

Sharaf-Eldeen et al. (1980) ont modifié le modèle à deux paramètres en réduisant le nombre de constantes (3 au lieu de 4) en supprimant la constante **b**. Ils ont souligné que **b** dans le modèle à deux paramètres (Eq.21) devait être égale à $(1 - a)$ pour $t = 0$ et $MR = 1$ et ont donc proposé la modification suivante :

$$\frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = a \cdot \exp(-kt) + (1 - a) \cdot \exp(-kat) \quad (22)$$

L'équation **(Eq.22)** est généralement connue comme le modèle exponentiel à deux paramètres.

3.6.3. Modèle exponentiel modifié à deux paramètres

Verma et al. (1985) ont modifié le deuxième terme du modèle exponentiel à deux paramètres en ajoutant une constante empirique et ils l'ont appliqué au séchage du riz :

$$\frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = a \cdot \exp(-kt) + (1 - a) \cdot \exp(-gt) \quad (23)$$

Ce modèle modifié **(Eq.24)** est connu sous le nom de modèle de Verma. **Kassem (1998)** a réarrangé le modèle de Verma en faisant apparaître la constante de séchage **k** dans la seconde exponentielle :

$$\frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = a \cdot \exp(-kt) + (1 - a) \cdot \exp(-kbt) \quad (24)$$

Cette forme modifiée **(Eq.24)** est connue comme une première approche du modèle diffusionnel. Ces deux modèles ont été modifiés pour appliquer à certains produits du séchage en même temps, et ont donné les mêmes résultats que prévu **(Akpınar et al., 2003 ; Toğrul et Pehlivan, 2003)**.

6.8. Modèle modifié de Henderson et Pabis

Karathanos, (1999) a amélioré le modèle de Henderson et Pabis et le modèle à deux paramètres par l'ajout d'un troisième terme de la série de solution générale de la deuxième loi de Fick. Karathanos a souligné que le premier terme explique la dernière phase du séchage, le second terme explique la phase intermédiaire, et que le troisième terme explique le début de la courbe de séchage (MR) :

$$\frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = a \cdot \exp(-kt) + b \cdot \exp(-gt) + c \cdot \exp(-ht) \quad (25)$$

Où :

a, b, et c sont des constantes (sans dimension), et k, g, et h sont les constantes cinétiques du séchage (s^{-1}). Ces constantes sont obtenues à partir des données expérimentales et **(Eq. 24)** est généralement connue sous le nom de modèle modifié de Henderson et Pabis.

6.9. Modèle de Thompson

Thompson et al. (1968) ont développé un modèle à partir des résultats expérimentaux du séchage de grains décortiqués dans une gamme de température de 60 à 150 °C.

$$t = a \ln(MR) + b[\ln(MR)]^2 \quad (26)$$

Où : a et b sont des constantes sans dimension obtenues à partir des données expérimentales. Ce modèle a été utilisé par **Shi et al. (2008)**.

6.10. Modèle empirique de Wang et Singh

Singh et Wang (1978) ont proposé un modèle empirique, pour décrire les caractéristiques de séchage du produit, selon l'équation suivante :

$$\frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = 1 + at + bt^2 \quad (27)$$

Où :

a et b sont des constantes de séchage. Ce modèle a été utilisé par **Mirzaee et al. (2010)**.

6.11. Modèle de Kaleemullah

Kaleemullah (2002) a créé un modèle empirique qui comprenait MR, T et t. Il l'a appliqué au séchage des piments rouges (**Kaleemullah et Kailappan, 2006**) :

$$\frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = \exp(-cT) + bt^{(pT+n)}$$

(28)

Où : la constante c'est en °C⁻¹ s⁻¹, la constante b en s⁻¹, p en C⁻¹ et n est sans dimension.

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.

CHAPITRE IV

Les huiles essentielles de la coriandre

1. Généralités sur les huiles essentielles

Les huiles essentielles sont des substances huileuses, volatiles, d'odeur et de saveur généralement fortes, extraites à partir des différentes parties de certaines plantes aromatiques, par les méthodes de distillation, par enflourage, par expression, par solvant ou par d'autres méthodes (**Belaiche, 1979 ; Valnet, 1984 ; Wichtel et Anthon, 1999**). La norme française AFNOR NF T75-006 définit l'huile essentielle comme : «un produit obtenu à partir d'une matière première végétale, soit par entraînement à la vapeur, soit par des procédés mécaniques à partir de l'épicarpe des Citrus, et qui sont séparés de la phase aqueuse par procédés physiques (**Garnero, 1996**).

2. Répartition, localisation et fonction

Selon **Bruneton, (1999)**, les huiles essentielles n'existent quasiment que chez les végétaux supérieurs, les plantes capables d'élaborer les constituants qui composent ces huiles essentielles sont connues sous le nom de plantes aromatiques, réparties dans un nombre limité de familles, ex : Myrtacées, Lauracées, Rutacées, Lamiacées, Astéracées, Apiacées, Cupressacées, Poacées, Zingibéracées, Pipéracées, etc.

Tous les organes végétaux peuvent renfermer des huiles essentielles en particulier les sommités fleuries (Lavande, Menthe). On les trouve aussi dans les écorces (Cannelier), les racines (Vétiver), les rhizomes (Gingembre), les fruits (Anis, Fenouil, Badiane), le bois (Camphrier), les feuilles (Citronnelle, Eucalyptus), les graines (Muscade) et les boutons floraux (clou de Girofle) (**Belaiche, 1979 ; Paris et Hurabielle, 1981 ; Bruneton, 1999 ; Ghestemet al ; 2001**).

Pour **Guignard et al. (1985)**, il n'existe pas de règle générale concernant les lieux d'accumulation des métabolites secondaires telles que les huiles essentielles dans l'organisme végétal. Par contre pour **Garneau, (2004)**, la plupart des huiles essentielles se retrouvent dans des glandes. Les structures glandulaires et les cellules sécrétrices isolées peuvent se rencontrer dans tous les organes végétaux, végétatifs et reproducteurs. Plusieurs catégories de tissus sécréteurs peuvent coexister simultanément chez une même espèce, voire dans un même organe.

Certains auteurs pensent que les huiles essentielles pourraient avoir un rôle attractif vis-à-vis des insectes pollinisateurs et favoriseraient ainsi la pollinisation (**Bruneton, 1999 ; Abou Zeid, 2000 ; Guignard, 2000**). D'autres auteurs affirment que les huiles essentielles jouent un rôle hormonal, régulateur et catalyseur dans le métabolisme végétal et semblent aider la plante à s'adapter à son environnement. **Belaiche, (1979)** signale que l'utilité des huiles

essentielles pour les plantes désertiques est liée à la conservation d'une humidité indispensable à la vie des plantes. Les vapeurs aromatiques permettent de saturer l'air autour de la plante empêchant, le jour, la température de l'air de monter jusqu'à un degré insupportable pour la vie végétale et la nuit de baisser de façon excessive.

Les essences pourraient constituer des supports à une communication et ce d'autant mieux que leur variété structurale autorise le transfert de messages biologiques sélectifs (Bruneton, 1999), tandis que Guignard *et al.* (1985) considèrent l'huile comme une source énergétique : «mis en réserve pendant le jour, ils seraient dégradés durant la nuit en acétyl CoA ».

3. Méthodes d'extraction des huiles essentielles

L'extraction des huiles essentielles des matières végétales peut être réalisées au moyens de nombreux et divers procédés, basés sur des divers techniques anciennes : Distillation ,expression, enfleurage ,ou incision ou plus récentes :extraction par microonde ou ultrason (De castro *et al* ; 1999). La distillation reste la méthode la plus prisée du fait qu'elle est facile a mettre en œuvre. La figure 07 regroupe les différentes voix d'extraction des huiles essentielles.

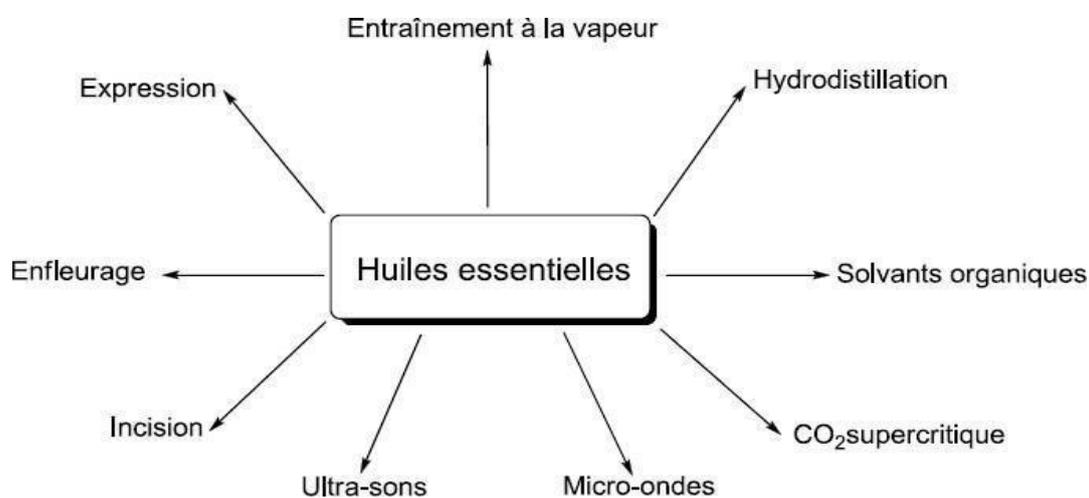


Figure 6: Mode d'extraction des huiles essentielles (De castro *et al.* , 1999).

4. La filière des huiles essentielles

Les plantes aromatiques donnent les huiles essentielles (HE), essences destinées à l'utilisation industrielle. Ces HE ne sont pas forcément des produits finaux dans la mesure où, une fois produites, elles peuvent servir d'intrants à la fabrication de plusieurs produits : elles sont destinées en effet à quatre grands secteurs industriels (**Grysole, 2004**).

4.1. Secteur parfumerie/ cosmétique

L'utilisation des huiles essentielles comme base dans la fabrication de parfums constitue une pratique courante depuis des siècles dans la plupart des civilisations. L'Europe et les Etats- Unis ont développé des industries importantes qui démarquent par leur haut niveau d'exportation dans ce domaine. La consommation d'huiles dans ce secteur se caractérise par le besoin d'une très grande variété de produits, de quantités relativement faibles et de prix souvent élevés.

4.2. Secteur parfumerie technique

La parfumerie technique (qui comprend les produits d'entretien ménager domestiques ou industriels) a également recours aux huiles essentielles pour l'image de propreté à laquelle elles sont associées, mais aussi parfois pour leurs propriétés antiseptiques. Par exemple, la citronnelle dégage un parfum qui indique au visiteur que l'endroit a été fraîchement lavé. Dans ce secteur, l'industrie consomme de grandes quantités d'huiles, au meilleur prix possible, car l'industrie désire garder le prix de revient de son produit au minimum.

4.3. Secteur alimentaire

L'industrie alimentaire utilise les huiles essentielles pour rehausser le goût des aliments, pour parfumer et colorer. Le secteur des boissons gazeuses s'avère un gros consommateur d'huiles. Aussi, les fabricants d'aliments préparés les utilisent de plus en plus parce que le nombre de produits augmente et le consommateur recherche d'avantage les produits avec des ingrédients naturels. Dans ce secteur, les volumes d'huiles essentielles peuvent être très importants. L'huile la plus utilisée dans le monde est l'huile essentielle d'orange.

4.4. Secteur médecine

Dans le domaine de la santé, il faut distinguer le secteur pharmaceutique de celui des médecines douces. Dans ce deuxième secteur, les vertus thérapeutiques des huiles sont reconnues et utilisées depuis des siècles dans beaucoup de pays. En effet, ce marché a donné

naissance à une industrie des produits naturels comme les produits homéopathiques. Cette industrie, très développée en Europe, bénéficie d'un attrait croissant de la part des consommateurs non seulement en Europe mais aussi en Amérique du Nord. De plus, les produits naturels avec effets thérapeutiques ont attiré l'attention des divers groupes pharmaceutiques.

Les huiles à utilisation médicinale peuvent être vendues pures en petits flacons ou sous forme de vaporisateurs, de pastilles, de bonbons... Ces huiles peuvent également être utilisées comme inhalant pour soulager les difficultés respiratoires, comme dentifrice (dans l'eau), ainsi que pour rafraîchir ou soulager la gorge (**Grysole, 2004**). Par conséquent, les huiles essentielles ont une variété d'applications et, dans bien des cas, la même huile peut être recherchée pour des propriétés différentes selon les secteurs industriels. Les propriétés médicinales des HE sont nombreuses, mais chacune possède ses vertus particulières (**Nicole, 1996**).

DEUXIEME PARTIE
Partie expérimentale

Chapitre I

Optimisation de l'extraction par microondes des composés phénoliques par MSR

Résumé

Le rendement d'extraction des composés phénoliques totaux (CPT) et la maximisation de la capacité antioxydante totale (CAT) des feuilles de coriandre ont été examinés à l'aide de la méthodologie de surface de réponse. L'extraction assistée par micro-ondes a été utilisée pour obtenir les CPT. Un plan Box-Behnken a été utilisé pour analyser les effets de trois variables indépendantes : la concentration du solvant (éthanol/eau 20–80 %), la puissance des micro-ondes (100–500 watts) et le temps d'irradiation (30–150 secondes) sur la réponse. Un modèle polynomial d'ordre deux a été développé pour prédire les résultats, et l'analyse de régression a indiqué qu'environ 99 % des variations pouvaient être expliquées par le modèle. Les valeurs prédites pour les CPT et la CAT étaient de 50,97 mg GAE/g de poids sec et 5,75 mg GAE/g ps, respectivement. L'analyse de surface de réponse a identifié les paramètres d'extraction optimaux pour maximiser le rendement antioxydant comme étant 52,62 % d'éthanol, 452,12 watts et 150 secondes. Dans ces conditions optimales, les valeurs expérimentales pour les CPT et la CAT étaient de $49,63 \pm 0,93$ mg GAE/g et $5,55 \pm 0,07$ mg GAE/g ps, respectivement. Ces valeurs expérimentales étaient étroitement alignées avec les valeurs prédites, démontrant l'efficacité du modèle et le succès de la méthodologie de surface de réponse dans l'optimisation des conditions d'extraction.

Mots clés: *Coriandrum sativum*; extraction assistée par micro-ondes; méthodologie de surface de réponse; capacité antioxydante totale; composés phénoliques totaux.

Abstract

The extraction yield of total phenolic compounds (TPC) and the maximization of total antioxidant capacity (TAC) from coriander leaves were examined using response surface methodology. Microwave-assisted extraction was employed to obtain TPC. A Box-Behnken design was utilized to analyze the effects of three independent variables: solvent concentration (ethanol/water 20–80%), microwave power (100–500 watts), and irradiation time (30–150 seconds) on the response. A second-order polynomial model was developed to predict the outcomes, and regression analysis indicated that approximately 99% of the variations could be explained by the model. The predicted values for TPC and TAC were 50.97 mg GAE/g dry weight (dw) and 5.75 mg GAE/g dw, respectively. Response surface analysis identified the optimal extraction parameters for maximizing antioxidant yield as 52.62% ethanol, 452.12 watts, and 150 seconds. Under these optimal conditions, the experimental values for TPC and TAC were 49.63 ± 0.93 mg GAE/g dw and 5.55 ± 0.07 mg GAE/g dw, respectively. These experimental values closely aligned with the predicted values, demonstrating the effectiveness of the model and the success of response surface methodology in optimizing the extraction conditions.

Keywords: *Coriandrum sativum*; microwave-assisted extraction; response surface methodology; total antioxidant capacity; total phenolic compounds.

1. Introduction

Les polyphénols sont des composés bioactifs présents en abondance dans divers aliments à base de plantes qui ont des propriétés antioxydantes (**Hihat *et al.*, 2017 ; Touati *et al.*, 2016**). Ils sont connus pour leurs bienfaits potentiels pour la santé, y compris la réduction de l'inflammation et la protection contre certaines maladies chroniques telles que les maladies cardiovasculaires, le cancer, le diabète et les troubles neurodégénératifs (**Morinova *et al.*, 2005 ; Forzato *et al.*, 2020**). Polyphénols jouent également un rôle crucial dans la conservation des aliments en raison de leur antioxydant et antimicrobien activités. Lorsqu'ils sont utilisés dans la conservation des aliments, les polyphénols aident à prévenir l'oxydation et détérioration en inhibant la croissance des microorganismes. Cela peut prolonger la durée de conservation des aliments produits et de maintenir leur qualité pendant de plus longues périodes (**Sakhraoui *et al.*, 2023**).

La coriandre est une herbe polyvalente qui a un goût distinctif et arôme. elle est largement utilisée dans différentes cuisines à travers le monde et peut être utilisé dans divers formes, y compris les feuilles et les graines (**Hihat *et al.*, 2017**). En plus de ses utilisations culinaires, la coriandre présente de nombreux avantages pour la santé qui en font un ajout précieux à n'importe quel régime. Selon une étude réalisée par Ashika et al. (**Ashika *et al.*, 2018**), les feuilles de coriandre contiennent vanillique, p-coumarique, ciséfêrulique, et les acides trans-fêruliques, qui sont responsables des propriétés antioxydantes de la plante. De plus, **Scandar et al. (2023)** ont constaté que les feuilles et les tiges de coriandre sont les plus parties nutritives et bénéfiques de la plante. **Nhut et al. (2020)** trouvé que les feuilles de coriandre contiennent de la rutine, un type de flavonoïde qui a des propriétés antioxydantes, anti-inflammatoires et anticancéreuses propriétés. L'étude a également révélé que la teneur totale en flavonoïdes, le composé considéré comme l'un des métabolites secondaires des plantes, démontre l'efficacité des rôles biologiques tels que l'inhibition de l'agrégation plaquettaire plasmatique, la libération d'histamine et l'activité antivirale.

L'extraction est la première et la plus importante étape de la récupération et de la purification de composés bioactifs à partir de matières végétales. Parmi les diverses techniques d'extraction, certaines méthodes nouvelles et sophistiquées ont été introduites et étudiées pour améliorer l'efficacité ; en particulier, l'extraction assistée par micro-ondes (MAE) a suscité une attention considérable ces dernières années en raison de son efficacité à extraire des composés bioactifs de diverses sources végétales (**Putnic *et al.*, 2018 ; Zecovic *et al.*, 2016**). La MAE présente des avantages tels que des temps d'extraction réduits, des

rendements plus élevés et un impact environnemental moindre par rapport aux méthodes traditionnelles, comme l'extraction par Soxhlet et la macération (**Salazar et al., 2023**) Le succès de la MAE dépend de plusieurs facteurs, tels que le choix du solvant, le temps d'exposition, la température et les spécifications de l'équipement (**Das et al., 2022**). De plus, le mécanisme de chauffage unique des micro-ondes permet des processus d'extraction plus rapides et une meilleure conservation des composés thermolabiles, en comparaison avec les méthodes de chauffage conventionnelles (**Dean, 2022 ; Verma et al., 2022**). En outre, la MAE a été reconnue comme une technique respectueuse de l'environnement, minimisant la consommation d'énergie et l'utilisation de solvants, ce qui en fait une méthode idéale pour extraire des composés bioactifs à partir de déchets agro-industriels (**Arellano et al., 2022**).

La méthodologie de la surface de réponse est une technique statistique et mathématique utilisée pour moduler et optimiser les paramètres d'un processus (**Bouallege et al., 2020**). Elle est particulièrement utile dans divers domaines, tels que l'optimisation de la conception technique, chimique et biologique, ainsi que dans l'optimisation des procédés et l'extraction de produits naturels (**Vesa et al., 2023**). Cette approche systématique permet de relier les variables d'entrée aux réponses, offrant ainsi une méthode rentable et efficace pour l'optimisation des processus expérimentaux. L'importance de la méthodologie de la surface de réponse réside dans sa capacité à approximer la relation entre les variables d'entrée et de sortie, ce qui favorise l'optimisation de systèmes complexes et met en évidence les effets synergiques des paramètres du processus. La méthodologie comprend la conception des expériences, l'analyse des résultats et la création de modèles pour améliorer les résultats dans diverses applications.

Les plans utilisés dans le cadre de cette méthodologie incluent des plans quadratiques, tels que les plans de Box-Behnken ou les plans composites centraux (Box-Wilson). La modélisation de la réponse est effectuée à l'aide de techniques de régression qui établissent un lien entre une réponse et un ensemble de facteurs (**Myers et al., 2009**).

Le but de cette étude est d'améliorer l'efficacité d'extraction des antioxydants des feuilles de coriandre par extraction assistée par micro-ondes. Cela sera réalisé en modifiant et en optimisant les conditions d'extraction, qui incluent la concentration en solvant, la puissance des micro-ondes et le temps d'irradiation. La méthodologie de la surface de réponse sera utilisée pour déterminer les conditions optimales d'extraction des composés phénoliques totaux et de la capacité antioxydante totale.

2. Matériel et méthodes

2.1. Réactifs chimiques

Le réactif DPPH (2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl) et le carbonate de sodium (Na_2CO_3) ont été achetés auprès de Sigma-Aldrich (Darmstadt, Allemagne). Le réactif phénolique Folin–Ciocalteu ($\text{H}_3\text{PW}_{12}\text{O}_{40}$) et l'acide gallique proviennent de Biochem, Chemopharma (Montréal, QC, Canada). De l'éthanol (Sigma–Aldrich, $\geq 99,8\%$ (GS)) de pureté analytique a également été utilisé. Tous les produits chimiques et solvants employés étaient de qualité analytique.

2.2. Préparation des échantillons

Dans cette étude, la plante de coriandre a été achetée sur un marché local de la région de Béjaïa, au nord de l'Algérie. Les feuilles ont été séparées de la tige, lavées à l'eau du robinet puis à l'eau distillée, et laissées sécher pendant environ 48 heures à température ambiante dans une pièce ventilée et sombre. L'échantillon séché a ensuite été broyé pour obtenir une poudre fine d'un diamètre inférieur à $250\ \mu\text{m}$ à l'aide d'un broyeur (A11 basic broyeur d'Ika, Staufen, Allemagne). La poudre a été stockée à $-20\ ^\circ\text{C}$ avant l'analyse. La teneur en humidité a été déterminée par poids constant à $105\ ^\circ\text{C}$ et s'est avérée être de $80 \pm 0,5\ \%$. L'activité de l'eau (A_w) a été mesurée à l'aide d'un instrument Hygro Palm A_w (Rotronic AG Bassersdorf, Suisse) et a montré une valeur de $0,18 \pm 0,02$ à une température de $20,6\ ^\circ\text{C}$.

2.3. Travail expérimental

Pour optimiser la procédure d'extraction assistée par micro-ondes, une série d'expériences a été menée pour déterminer les effets des paramètres individuels du processus. Cette approche a été choisie afin de minimiser le travail expérimental total tout en fournissant des informations précieuses pour améliorer la procédure. Grâce à cette méthode, l'impact de chaque paramètre a pu être évalué, permettant d'identifier les facteurs les plus significatifs. Cela a conduit à un processus d'optimisation plus ciblé et efficace (**tableau 1**). Les facteurs ont été maintenues constantes (50 %, 500 watts et 150 s pour la concentration en éthanol, la puissance des micro-ondes et le temps d'irradiation, respectivement) lorsqu'elles n'ont pas été étudiées.

Dans les essais à facteur unique et la méthodologie de la surface de réponse pour l'optimisation, l'accent a été mis sur l'évaluation du rendement d'extraction des composés phénoliques totaux ainsi que sur la maximisation de la capacité antioxydante globale. Ensuite,

un processus d'optimisation a été réalisé en utilisant une approche de méthodologie de surface, fondée sur un design Box-Behnken, pour affiner les conditions (**Voir Tableau 2**).

Le plan expérimental appliqué était un plan de boîte à trois facteurs à trois niveaux-Behnken, et le nombre requis d'expériences (N) a été déterminé en utilisant la formule décrite dans l'équation (29):

$$N = 2k(k - 1) + C_0 \quad (29)$$

Où : k est le nombre de facteurs et C₀ est le nombre de points centraux (3).

Pour analyser les données, une analyse de régression a été réalisée pour ajuster une équation polynomiale du second ordre (modèle quadratique) basée sur l'équation générale (**équation (30)**) afin de prédire les conditions optimales pour le processus d'extraction.

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i x_i + \sum_{i=1}^3 a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 a_{ij} x_i x_j \quad (i \neq j) \quad (30)$$

Où : y représente la fonction de réponse;

a₀ : est un coefficient constant;

a_i, a_{ii} et a_{ij} sont les coefficients des termes linéaires, quadratiques et d'interaction, respectivement, et x_i et x_j représentent les variables indépendantes codées.

Les niveaux de facteur ont été codés comme -1 (faible), 0 (point central ou milieu) et 1 (élevé). Les variables ont été codées selon l'équation suivante (**équation (31)**).

$$x_i = \frac{X_i - X_0}{\Delta X} \quad (31)$$

Où :

x_i : représente une nouvelle variable sans dimension dérivée de la variable d'origine X_{ii}. X₀ correspond à la valeur de référence ou initiale, et ΔX désigne l'incrément ou une étape de discrétisation.

Après l'analyse de la variance, les coefficients de régression pour les termes linéaires, quadratiques et d'interaction ont été déterminés. Pour illustrer l'impact des variables indépendantes et de leurs interactions, des tracés de surface tridimensionnels ont été créés à partir de l'équation polynomiale ajustée en utilisant ces coefficients de régression. Pour

valider la fiabilité du modèle, des expériences supplémentaires ont été menées dans les conditions optimales prédites par la méthodologie de surface de réponse. Les résultats expérimentaux obtenus ont ensuite été comparés aux valeurs prévues par le modèle de régression.

2.4. Procédé d'extraction assistée par micro-ondes

Pour optimiser le processus d'extraction assistée par micro-ondes, les paramètres suivants ont été sélectionnés : la concentration en solvant, la puissance des micro-ondes et le temps d'irradiation. Une quantité de 1 g de poudre de feuilles de coriandre a été placée dans un ballon de fond de 250 ml contenant différentes concentrations d'éthanol-eau. La suspension a été extraite sous diverses concentrations de solvant, puissances des micro-ondes et temps d'irradiation. Les extraits ont ensuite été séparés par centrifugation à 3000 tr/min (NF 200, Nüve, Turquie) pendant 10 minutes et stockés à 4 °C jusqu'à leur utilisation. Quinze essais ont été réalisés avant de déterminer les conditions optimales. Une extraction a ensuite été effectuée dans ces conditions optimales, établies à l'aide de la méthodologie de réponse de surface. Les composés phénoliques totaux et la capacité antioxydante totale ont été pris en compte dans les tests d'optimisation de la méthodologie de la surface de réponse et de validation du modèle.

2.5. Paramètres de réponse

2.5.1. Détermination des composés phénoliques totaux

Les composés phénoliques totaux (CPT) des échantillons de plantes ont été déterminés à l'aide du réactif Folin-Ciocalteu, selon la méthode rapportée par Singleton et Rossi (**Singleton et Rossi, 1965**). Un volume de 0,1 ml de l'extrait a été mélangé avec 0,8 ml de réactif Folin-Ciocalteu (10 % v/v) et 0,4 ml de carbonate de sodium (7,5 % p/v). Après 60 minutes d'incubation à température ambiante, l'absorbance a été mesurée à 720 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV/Vis, en utilisant un blanc préparé de la même manière que l'échantillon, mais avec 0,1 ml de solvant d'échantillon. Les résultats ont été exprimés en milligrammes d'équivalent d'acide gallique par gramme de poids sec (mg GAE/g pw), en se référant à une courbe d'étalonnage.

2.5.2. Évaluation de la capacité antioxydante totale

La capacité antioxydante totale (CAT) des échantillons de plantes a été évaluée à l'aide de la méthode du radical DPPH, comme rapporté par Brand-Williams (**Brand williams et al.,**

1995). Un volume de 0,2 ml de l'extrait a été mélangé avec 1 ml de solution méthanolique de DPPH (60 μ M). L'absorbance a été mesurée à 515 nm après 30 minutes d'incubation à température ambiante, les résultats ont été comparés à ceux d'un témoin (préparé de la même manière que l'échantillon, mais avec 0,2 ml de solvant). Les résultats sont exprimés en milligrammes d'équivalent d'acide gallique par gramme de poids sec (mg GAE/g pw), en se référant à une courbe d'étalonnage.

I.2.6. Analyse Statistique

Tous les essais d'extraction et les analyses subséquentes ont été réalisés en triple exemplaire, et les résultats sont présentés sous forme de moyennes \pm écart-type. L'impact de chaque facteur sur le rendement en CPT et le CAT dans l'expérience à facteur unique pour l'extraction assistée par micro-ondes a été évalué à l'aide d'une ANOVA et d'un test post hoc de Tukey, avec un niveau de confiance de 95 % pour déterminer la signification statistique. Les données issues des expériences de conception Box-Behnken pour l'extraction assistée par micro-ondes ont également été soumises à une ANOVA afin d'évaluer la signification et la pertinence du modèle pour la variable de réponse. Les seuils de signification de $p < 0,05$, $p < 0,01$ et $p < 0,001$ ont été considérés comme indiquant des résultats significatifs, élevés et très élevés, respectivement. Le logiciel JMP (version 17.0, SAS, Cary, Caroline du Nord, États-Unis) a été utilisé pour analyser tous les résultats expérimentaux et pour créer la conception de Box-Behnken.

3. Résultats et discussion

3.1. Effet des facteurs uniques

L'influence des différents paramètres d'extraction sur le rendement en composés phénoliques totaux et de l'activité antioxydante totale a été étudiée en faisant varier un paramètre à la fois. Les facteurs examinés étaient la concentration d'éthanol, la puissance des micro-ondes et le temps d'irradiation. Le choix du bon solvant d'extraction est crucial pour déterminer la quantité et la qualité des composés phénoliques extraits. L'acétone, l'éthanol et le méthanol sont couramment utilisés pour extraire ces composés des plantes (**Boeing et al., 2014**). Toutefois, en raison des problèmes de toxicité associés au méthanol et à l'acétone, qui ne conviennent pas aux applications alimentaires, l'éthanol a été préféré. Ce solvant présente plusieurs avantages, notamment une efficacité d'extraction plus élevée, une empreinte écologique réduite et une diminution des coûts.

Le tableau 1 représente les résultats des expériences à facteur unique pour l'extraction assistée par micro-ondes à partir des feuilles de coriandre.

Tableau 01 : Résultats des expériences à facteur unique pour l'extraction assistée par micro-ondes à partir des feuilles de coriandre

Concentration du solvant (%)			Puissances microonde (watt)			Temps d'irradiations (sec)		
% v/v	CPT (mg GAE/g dw)	CAT (mg GAE/g dw)	watt	CPT (mg GAE/g dw)	CAT (mg GAE/g dw)	^s	CPT (mg GAE/g dw)	CAT (mg GAE/g dw)
10	37.85±0.24 ^c	2.92±0.11 ^c	100	36.43±0.65 ^{bc}	3.25±0.13 ^{bc}	30	38.66±0.14 ^c	3.06±0.13 ^c
20	39.35±0.34 ^{ab}	3.11±0.09 ^{ab}	300	40.97±0.93 ^a	3.89±0.08 ^a	90	43.08±0.27 ^a	4.03±0.07 ^a
50	42.91±0.48 ^a	3.91±0.21 ^a	500	38.46±0.29 ^b	2.48±0.01 ^b	150	40.98±0.75 ^b	3.59±0.05 ^b
80	40.80±0.82 ^b	3.50±0.19 ^b	700	37.89±0.83 ^{bc}	3.33±0.15 ^{ab}	210	39.71±0.53 ^{bc}	3.26±0.14 ^{ab}
100	38.65±0.59 ^c	2.89±0.04 ^c	900	35.96±0.47 ^c	2.98±0.09 ^{bc}	270	38.88±0.71 ^c	2.92±0.04 ^c

Les résultats sont présentés sous forme de moyenne ± écart-type (SD). Les mêmes lettres dans une même colonne indiquent des moyennes non significativement différentes selon le test ANOVA. Valeurs statistiquement significatives à $p < 0,05$.

L'efficacité de l'extraction est fortement influencée par la concentration d'éthanol, comme l'indiquent diverses études (**Moreno et al., 2019**). Ainsi, l'impact de la variation de cette concentration a été évalué pour optimiser le rendement d'extraction. Selon **le tableau 1**,

les valeurs du PTC et du TAC variaient respectivement de $37,85 \pm 0,24$ à $42,91 \pm 0,48$ mg d'EAG/g de poids sec et de $2,92 \pm 0,11$ à $3,91 \pm 0,21$ mg EAG/g de poids sec. On observe que le TPC et le TAC augmentent significativement de 10 à 50 % de concentration, avant de diminuer à $38,65 \pm 0,59$ mg GAE/g de poids sec et $2,89 \pm 0,04$ mg d'EAG/g de poids sec, respectivement. Une tendance similaire a été rapportée pour l'extraction des polyphénols totaux d'autres matières végétales (Spigno *et al.*, 2007 ; Pan et Liu, 2003).

L'effet de la concentration d'éthanol sur l'extraction des antioxydants s'explique par des changements de polarité. Lorsque la concentration d'éthanol augmente, sa polarité diminue, ce qui améliore l'extraction de composés moins polaires (Cheoc *et al.*, 2012). De plus, une concentration plus élevée d'éthanol favorise la dégradation des membranes cellulaires, augmentant ainsi la capacité des solvants à pénétrer la matrice solide durant le processus d'extraction (Vatei *et al.*, 2009 ; Zhang *et al.*, 2006). À des concentrations d'éthanol élevées, la polarité résultante devient inadaptée à l'extraction des antioxydants des feuilles de coriandre, ce qui réduit leur efficacité. En tenant compte de ces résultats, une plage de concentration de 20 à 80 % a été sélectionnée pour les essais méthodologiques sur la surface de réponse.

La sélection de la puissance des micro-ondes est cruciale pour l'efficacité et le rendement du processus d'extraction des composés phénoliques. Une puissance micro-ondes plus élevée augmente la température, ce qui peut accélérer l'extraction en perturbant les liaisons hydrogène, en améliorant la pénétration du solvant dans la matrice et en facilitant la libération des composés cibles (Zeng *et al.*, 2023). Cependant, il est important de noter qu'il existe une limite à cet effet : au-delà d'un certain seuil, une augmentation de la puissance des micro-ondes peut ne pas apporter d'améliorations supplémentaires au rendement d'extraction. De plus, des niveaux de puissance trop élevés peuvent entraîner une dégradation des composés phénoliques en raison des températures élevées (Zahour et Khan, 2019). Comme le montre le **tableau 1**, la valeur de TPC, le rendement et le TAC variaient de $35,96 \pm 0,47$ à $40,97 \pm 0,93$ mg d'EAG/g de poids sec et de $2,98 \pm 0,09$ à $3,89 \pm 0,08$ mg d'EAG/g de poids sec, respectivement. La variation de la puissance des micro-ondes au cours de la gamme de puissance de 100 à 900 watts a entraîné une augmentation du rendement en CPT et en CAT, atteignant un maximum à 300 watts, suivi d'une diminution significative. Nos résultats étaient inférieurs à ceux rapportés dans la littérature (Dahmoune *et al.*, 2014). En fonction de ces résultats, nous avons sélectionné une plage de puissance des micro-ondes de 100 à 500 watts pour les essais de méthodologie de surface de réponse.

D'après le **tableau 1**, les valeurs du TPC et du TAC variaient respectivement de $38,66 \pm 0,14$ à $43,08 \pm 0,27$ mg d'EAG/g de poids sec et de $2,92 \pm 0,04$ à $4,03 \pm 0,07$ mg d'EAG/g de poids sec. Il est à noter que le TPC et le TAC ont considérablement augmenté entre 30 et 90 secondes d'irradiation, puis ont diminué, atteignant des valeurs de $38,88 \pm 0,71$ mg GAE/g de poids frais et de $2,92 \pm 0,04$ mg GAE/g de poids sec après un temps d'extraction prolongé. Nos résultats étaient supérieurs à ceux rapportés dans la littérature (**Zecovic et al., 2012**). Sur la base de ces observations, nous avons choisi un temps d'irradiation variant de 30 à 150 secondes pour les essais de méthodologie de surface de réponse.

Le **tableau 2** représente les variables indépendantes influençant l'extraction assistée par micro-ondes.

Tableau 02 : Variables indépendantes influençant l'extraction assistée par micro-ondes.

Variables indépendantes	Niveaux des facteurs		
	-1	0	+1
x₁ : concentration du Solvant (%)	20	50	80
x₂ : puissances microonde (watt)	100	300	500
x₃ : temps d'irradiation (s)	30	90	150

3.2. Optimisation par méthodologie de surface de réponse

3.2.1. Construction du plan d'expérience

L'optimisation de l'extraction des antioxydants des feuilles de coriandre, utilisant la méthodologie de surface, est réalisée à l'aide du modèle de Box-Behnken. Ce modèle vise à maximiser l'efficacité d'extraction des composés phénoliques totaux et de l'activité antioxydante totale, qui sont considérés comme variables de réponse. Trois paramètres indépendants ont été étudiés : la concentration de solvant (éthanol : 20-80%), la puissance des micro-ondes (100-500 watts) et le temps d'irradiation (30-150 s). Les limites inférieure et supérieure de chaque variable indépendante ont été établies en fonction des résultats obtenus lors de l'analyse uni-variée de travaux préliminaires (**Tableau 2**). Les niveaux des facteurs ainsi que les valeurs observées et prédites du PTC et du TAC sont résumés dans le tableau 3.

Tableau 3. Matrice de plan de Box-Behnken, valeurs expérimentales et prédites des composés phénoliques totaux et la capacité antioxydante totale.

	Niveaux des variables			CPT (mg GAE/g dw)		CAT (mg GAE/g dw)	
	x_1 concentration solvant	x_2 puissance microonde	x_3 temps	Valeurs observés	Valeurs prédites	Valeurs observés	Valeurs prédites
1	20 (-)	100 (-)	90 (0)	24.34	26,72	2.15	3,08
2	20 (-)	500 (+)	90 (0)	33.33	35,96	3.30	4,38
3	80 (+)	100 (-)	90 (0)	38.84	40,22	3.86	4,79
4	80 (+)	500 (+)	90 (0)	39.41	41,04	3.57	4,64
5	50 (0)	100 (-)	30 (-)	40.79	42,54	3.72	4,87
6	50 (0)	100 (-)	150 (+)	41.28	43,78	4.15	5,15
7	50 (0)	500 (+)	30 (-)	45.18	46,68	4.42	5,42
8	50 (0)	500 (+)	150 (+)	47.45	49,70	4.90	5,75
9	20 (-)	300 (0)	30 (-)	32.91	34,79	3.08	4,00
10	80 (+)	300 (0)	30 (-)	41.73	44,61	3.89	4,82
11	20 (-)	300 (0)	150 (+)	36.32	37,45	3.06	4,13
12	80 (+)	300 (0)	150 (+)	44.08	46,21	4.22	5,30
13	50 (0)	300 (0)	90 (0)	47.81	49,48	4.27	5,20
14	50 (0)	300 (0)	90 (0)	46.81	49,48	4.22	5,20
15	50 (0)	300 (0)	90 (0)	47.81	49,48	4.12	5,20

x_1 , concentration de solvant; x_2 , puissance micro-ondes; x_3 , temps d'irradiation; GAE: équivalent acide gallique; dw: poids sec des feuilles.

La quantité de composés phénoliques totaux (CPT) et la capacité antioxydante totale (TAC) de l'extrait de feuille de *Coriandrum sativum*, obtenue par la méthode d'extraction assistée par micro-ondes (MAE), variait de 26,34 à 49,70 mg d'acide gallique équivalent (GAE) par gramme de poids sec et de 3,08 à 5,75 mg d'EAG par gramme de poids sec, respectivement. Le rendement maximal en TPC et TAC a été enregistré lors d'extractions utilisant un solvant à 50 % (v/v), une puissance des micro-ondes de 500 watts et un temps d'irradiation de 150 secondes. **Hihat et al. (2017)**, qui ont étudié l'impact du four et du séchage aux micro-ondes sur les polyphénols totaux et la capacité antioxydante des feuilles de coriandre, ont rapporté des valeurs de 48,44 mg d'EAG par gramme de poids sec et de 82,21

% pour la capacité antioxydante.

3.2.2. Analyse du modèle

Pour évaluer la signification du modèle, une analyse de variance a été réalisée (ANOVA) a été effectuée. **Le tableau 4** présente les résultats de l'ANOVA concernant les effets de la concentration en solvant, de la puissance des micro-ondes et du temps d'irradiation sur le TPC et le TAC, par rapport à la relation avec le poids sec des feuilles de coriandre.

Tableau 4 : Analyse de la variance du modèle et du manque d'ajustement pour les composés phénoliques totaux et la totale capacité antioxydante des feuilles de coriandre.

Source	DF	Somme des carrés	Carrée moyen	F Ratio	Prob. > F
CPT (mg GAE/g dw)					
Modèle	9	619.553	68.839	87.880	<.0001*
Erreur	5	3.916	0.783		
Total corrigé	14	623.470			
Manque d'ajustement	3	3.250	1.083	3.250	0.2441
Erreur Pure	2	0.666	0.333		
Erreur totale	5	3.916			
R ²	0.994				
R ² ajustée	0.982				
CAT (mg GAE/g dw)					
Modèle	9	6.401	0.711	35.498	0.0005**
Erreur	5	0.100	0.020		
Total corrigé	14	6.502			
Manque d'ajustement	3	0.088	0.029	5.058	0.1695
Erreur Pure	2	0.011	0.005		
Erreur totale	5	0.100			
R ²	0.984				
R ² ajustée	0.956				

* Valeurs statistiquement significatives (p < 0,05).

Les coefficients de détermination (R²) pour les modèles CPT et CAT sont respectivement de 0,994 et 0,984, ce qui signifie qu'un très faible pourcentage de la variation

totale, soit 0,06 % et 0,16 %, reste inexpliqué par ces modèles. De plus, les coefficients de détermination ajustés (R^2 adj) pour les modèles TPC et TAC sont respectivement de 0,982 et 0,956, indiquant un bon accord entre les valeurs expérimentales et prédites.

Le test d'absence d'ajustement permet d'évaluer la pertinence du modèle pour décrire les données expérimentales, ou si un autre modèle devrait être envisagé. Les valeurs de test d'ajustement pour CPT et CAT, respectivement de 0,2441 et 0,1695, sont supérieures à 0,05, ce qui les rend non significatives par rapport à l'erreur pure. Cela suggère que le modèle actuel est adéquat pour s'ajuster aux données expérimentales.

Les coefficients de régression pour l'ordonnée à l'origine, ainsi que pour les termes linéaires, quadratiques et d'interaction des modèles, ont été calculés à l'aide de la méthode des moindres carrés et sont présentés dans le tableau 5. L'ANOVA des coefficients de régression a révélé une réponse linéaire significative en fonction de la valeur p des concentrations de solvant (x_1), qui étaient très significatives ($p < 0,0001$), suivies par la puissance des micro-ondes (x_2) et le temps d'irradiation (x_3) pour le TPC et le TAC.

En ce qui concerne les interactions entre variables, seule l'interaction entre la concentration en solvant et la puissance des micro-ondes (x_1x_2) a eu un effet significatif sur le TPC ($p < 0,0051$) et le TAC ($p < 0,0038$). Dans le modèle quadratique, seules les concentrations de solvant (x_1^2) et la puissance des micro-ondes (x_2^2) étaient significatives pour le TPC ($p < 0,0001$ et $p < 0,0002$, respectivement), tandis que pour le TAC, seules la concentration en solvant (x_1^2) et le temps d'irradiation (x_3^2) étaient significatives ($p < 0,0001$ et $p < 0,0314$, respectivement).

Les équations mathématiques reliant le CPT et le CAT (équation (32) et équation (33), respectivement) aux variables du processus sont présentées ci-dessous sous forme de facteurs codés, en excluant les termes non significatifs.

$$CPT = 49.476 + 4.645x_1 + 2.515x_2 + 1.065x_3 - 2.105x_1x_2 - 9.205x_1^2 - 4.290x_2^2 \quad (32)$$

$$CAT = 5.203 + 0.493x_1 + 0.288x_2 + 0.152x_3 - 0.360x_1x_2 - 0.859x_1^2 + 0.218x_3^2 \quad (33)$$

Tableau 5. Coefficient de régression, erreur type et résultats du test t de Student de la surface de réponse de TPC et le TAC faisait référence au poids sec des feuilles de coriandre.

Paramètres	Estimation	Erreur standard	t Ratio	Prob > t
CPT (mg GAE/g dw)				
Ordonnée à l'origine	49.476	0.510	96.83	<.0001*
Concentration solvant (x_1)	4.645	0.312	14.84	<.0001*
Puissance microonde (x_2)	2.515	0.312	8.04	0.0005*
Temps irradiation (x_3)	1.065	0.312	3.40	0.0192*
$x_1 * x_2$	-2.105	0.442	-4.76	0.0051*
$x_1 * x_3$	-0.265	0.442	-0.60	0.5754
$x_2 * x_3$	0.445	0.442	1.01	0.3608
$x_1 * x_1$	-9.205	0.460	-19.99	<.0001*
$x_2 * x_2$	-4.290	0.460	-9.32	0.0002*
$x_3 * x_3$	0.489	0.460	1.06	0.3368
CAT (mg GAE/g dw)				
Ordonnée à l'origine	5.203	0.081	63.67	<.0001*
Concentration solvant (x_1)	0.493	0.050	9.87	0.0002*
Puissances microonde (x_2)	0.288	0.050	5.77	0.0022*
Temps d'irradiation (x_3)	0.152	0.050	3.05	0.0285*
$x_1 * x_2$	-0.360	0.070	-5.09	0.0038*
$x_1 * x_3$	0.087	0.070	1.24	0.2713
$x_2 * x_3$	0.012	0.070	0.18	0.8667
$x_1 * x_1$	-0.859	0.073	-11.66	<.0001*
$x_2 * x_2$	-0.124	0.073	-1.69	0.1527
$x_3 * x_3$	0.218	0.073	2.96	0.0314*

* Valeurs statistiquement significatives ($p < 0,05$).

3.2.3. Analyse des graphiques décrivant l'effet des facteurs

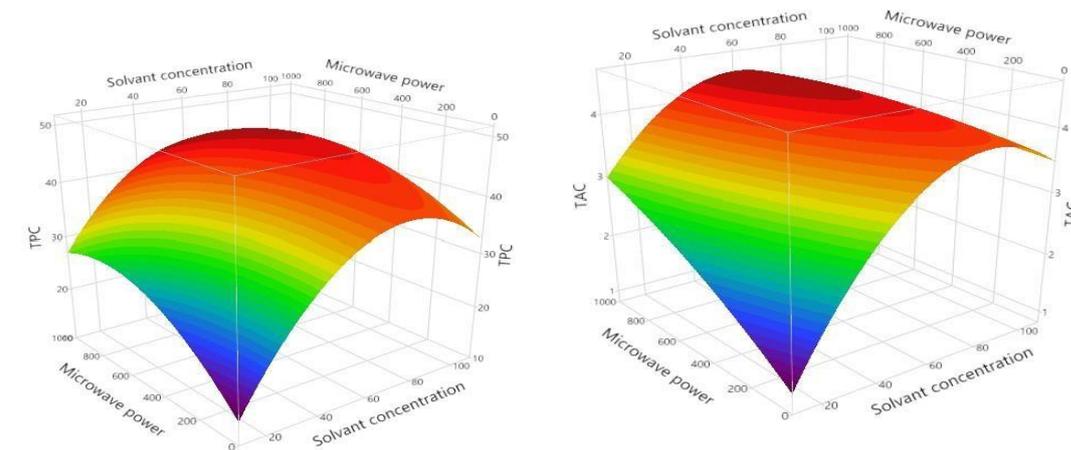
La méthode la plus efficace pour illustrer l'impact d'une variable indépendante sur le rendement d'extraction des polyphénols totaux (TPC) et des composés actifs totaux (TAC) consiste à générer des tracés de surface de réponse à l'aide d'un modèle. Cette démarche implique de manipuler deux variables dans la plage expérimentale étudiée, tout en maintenant la variable restante à son niveau central (niveau 0) (**Hayat et al., 2009**). La figure 7 présente l'influence de la concentration en solvant, de la puissance des micro-ondes et du temps d'irradiation sur le rendement d'extraction TPC et TAC des feuilles de coriandre.

Comme l'indique **la figure 7a**, une augmentation de la concentration en solvant (x_1) et de la puissance des micro-ondes (x_2) entraîne une augmentation du rendement en TPC et en TAC. Cependant, une concentration plus élevée de solvant (x_1) et une puissance des micro-ondes excessive (x_2) semblent avoir un effet négatif sur l'extraction, probablement en raison d'une diminution de la polarité du solvant (**Zhang et al., 2007**) et/ou de la dégradation des antioxydants.

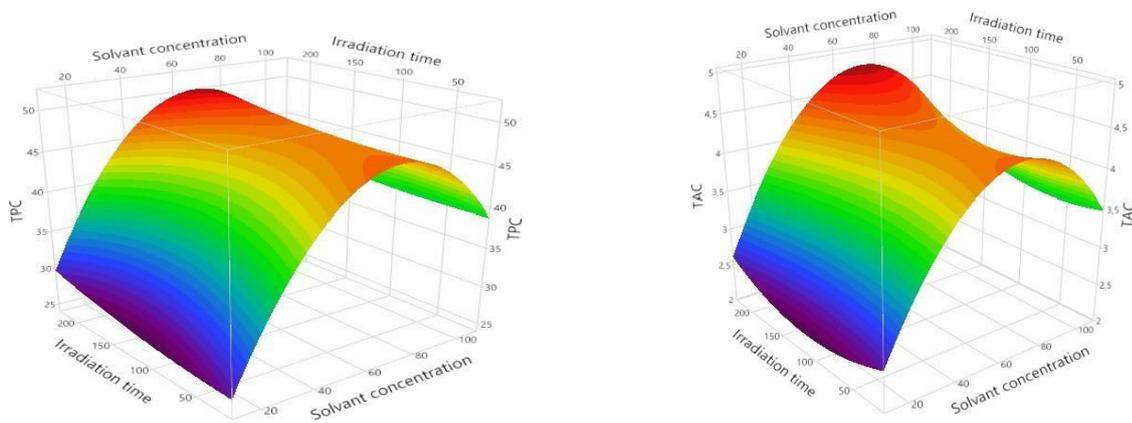
De plus, l'analyse des parcelles de surface a révélé des niveaux optimaux de concentration pour le CPT et le TAC, en raison de l'effet quadratique de la concentration de solvant (x_1^2), comme le montre le **tableau 5**. L'impact de la concentration de solvant s'est également avéré statistiquement significatif en interaction avec la puissance des micro-ondes (x_1x_2) (valeurs p de 0,0051 et 0,0038 pour TPC et TAC, respectivement). Cette observation corrobore une étude précédente qui a souligné l'importance du pourcentage d'éthanol sur le rendement d'extraction des polyphénols totaux du *Pistacia lentiscus* (**Dahmoune et al., 2014**).

La polarité joue un rôle crucial dans l'extraction des antioxydants provenant de diverses sources végétales et marines. Plusieurs études ont démontré que la polarité du solvant influence l'activité antioxydante des extraits. En augmentant la concentration d'éthanol dans le solvant, la membrane cellulaire se décompose, facilitant ainsi la pénétration du solvant dans la matrice solide (**Vatei et al. 2009**). Par ailleurs, une concentration d'éthanol plus élevée dans le solvant réduit sa polarité, ce qui favorise l'extraction de composants moins polaires [28]. Cependant, l'utilisation d'une concentration d'éthanol très élevée n'est pas adaptée pour l'extraction du TPC à partir du matériel végétal.

(a)



(b)



(c)

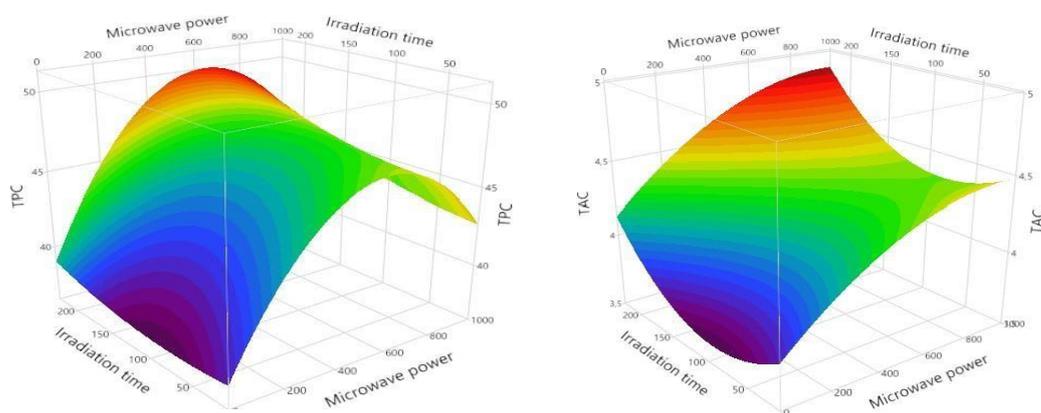


Figure 07 : Effets de la concentration en solvant et de la puissance des micro-ondes (a), de la concentration en solvant et temps d'irradiation (b), et puissance micro-ondes et temps d'irradiation (c) sur TPC (mg GAE / g) et TAC (mg d'EAG / g).

Selon la **figure 7b**, le rendement en TPC et en TAC est influencé par l'augmentation de la concentration en solvant (x_1) et par le temps d'irradiation (x_3). Il a été observé que ces deux facteurs influencent indépendamment l'extraction du TPC et du TAC. De plus, l'analyse des parcelles de surface a révélé qu'il existe des niveaux de concentration optimaux pour le TPC et le TAC, ce qui est attribué à l'effet quadratique du temps d'irradiation (x_3^2) tel que supporté par le **tableau 5**. L'impact de la concentration de solvant en interaction avec le temps d'irradiation (x_1x_3) s'est avéré être non significatif (valeur p 0,5754 et 0,2713 pour le TPC et le TAC, respectivement). Un allongé le temps d'extraction permet un contact prolongé entre la matière végétale et le solvant, faciliter le transfert des composés phénoliques dans le solvant. Cela peut entraîner une augmentation rendements d'extraction car plus de composés ont la possibilité d'être libérés de la plante matrice (**Jha et al., 2022**) .

Sur la base de la **figure 7c**, augmentation de la puissance des micro-ondes (x_2) et du temps d'irradiation (x_3) a entraîné des rendements plus élevés de TPC et de TAC. En d'autres termes, à la fois la puissance micro-ondes (x_2) et le temps d'irradiation (x_3) a influencé simultanément le TPC et le TAC. Cependant, il a été observé cette puissance micro-ondes a eu un impact plus important sur l'extraction du TPC que le temps d'irradiation. Il a été rapporté que l'absorption plus élevée de l'énergie des micro-ondes entraînait une augmentation des températures dans l'échantillon, provoquant une rupture cellulaire et facilitant la libération d'antioxydant composés (**Banos et al., 2019**) ; cependant, une puissance excessive peut également dégrader les composés sensibles (**Bey et al., 2014**). De plus, de nombreuses études ont signalé une baisse des niveaux de PTC récupérés lors de l'utilisation extraction assistée par micro-ondes pendant de longues périodes. Zhang et autres. **Zhang et al. (2012)** ont observé que les rendements de composés phénoliques d'*A. blazei* a augmenté de manière significative de 1 à 5 min au cours de l'extraction par microonde, suivi d'une légère diminution.

3.2.4. Validation du Modèle

Pour évaluer le pouvoir prédictif du modèle, des conditions optimales ont été établies en visant une désirabilité maximale. Ces conditions optimales pour atteindre le TPC le plus élevé et le TAC maximal étaient une concentration d'éthanol de 52,62 %, une puissance micro-ondes de 452,12 watts et un temps d'irradiation de 150 secondes. Sous ces conditions, les valeurs expérimentales de TPC et de TAC étaient respectivement de $49,63 \pm 0,93$ mg de GAE/g de poids sec et de $5,55 \pm 0,07$ mg de GAE/g de poids sec. Ces résultats expérimentaux concordaient bien avec les valeurs prédites pour le TPC et le TAC, qui étaient respectivement de 50,97 et 5,75 mg d'EAG/g de poids sec. **Zekovic et al. (2016)** ont étudié les graines de coriandre et ont rapporté des conditions optimales d'extraction assistée par micro-ondes, avec

une concentration en éthanol de 63 %, un temps d'extraction de 19 minutes et une puissance d'irradiation de 570 watts, afin de maximiser simultanément le rendement total en polyphénols et d'augmenter l'activité antioxydante. Leurs valeurs prédites pour le TPC et l'activité antioxydante étaient de 311,23 mg EAG/100g et 0,0315 mg/ml, respectivement.

Conclusion

La méthodologie de la surface de réponse (RSM) a été employée pour analyser et optimiser les effets individuels et interactifs de trois variables clés : la concentration en solvant, la puissance des micro-ondes et le temps d'irradiation. Ces paramètres ont été soigneusement sélectionnés pour maximiser l'efficacité de l'extraction assistée par micro-ondes de deux composants majeurs des feuilles de coriandre : la capacité antioxydante totale (TAC) et le contenu phénolique total (TPC). L'objectif principal était de développer un procédé permettant d'obtenir des rendements élevés tout en assurant une préservation optimale des propriétés bioactives des composés extraits.

Les résultats expérimentaux ont révélé une forte corrélation entre les données expérimentales et le modèle mathématique proposé, indiquant que l'utilisation d'un modèle polynomial quadratique est particulièrement adaptée pour modéliser l'extraction solide-liquide du TPC et du TAC. Les tracés de la surface de réponse générés par cette méthodologie ont permis d'identifier des interactions significatives entre les trois facteurs étudiés, démontrant leur influence marquée sur le rendement global de l'extraction. En particulier, les résultats ont mis en évidence que des conditions spécifiques, combinant 52,62 % d'éthanol aqueux comme solvant, une puissance micro-ondes de 452,12 watts, et une durée d'irradiation de 150 secondes, conduisent à une maximisation efficace des rendements du TPC et du TAC.

Les valeurs obtenues expérimentalement pour le TPC ($49,63 \pm 0,93$ mg d'EAG/g de poids sec) et pour le TAC ($5,55 \pm 0,07$ mg d'EAG/g de poids sec) étaient en excellent accord avec les valeurs prédites par le modèle quadratique, respectivement 50,97 mg d'EAG/g de poids sec pour le TPC et 5,75 mg d'EAG/g de poids sec pour le TAC. Ces résultats valident la robustesse et l'adéquation du modèle développé pour prédire avec précision les rendements d'extraction sous les conditions étudiées.

Ce procédé optimisé présente plusieurs avantages majeurs : il est simple, rapide, efficace et respecte l'intégrité des composés phénoliques sensibles. En outre, il offre un potentiel considérable pour une application à grande échelle, tant dans le domaine de la recherche que dans des secteurs industriels tels que l'agroalimentaire, la cosmétique et la pharmaceutique, où les composés antioxydants naturels jouent un rôle clé. Par conséquent, cette méthodologie constitue une avancée précieuse pour l'extraction de substances bioactives d'intérêt, tout en répondant aux exigences croissantes de durabilité et d'efficacité des procédés industriels modernes.

Chapitre II

Cinétiques de séchages et effets du séchage par étuve et microonde sur la qualité nutritionnelle de la coriandre

Résumé

Dans cette partie de la pratique, les feuilles de coriandre ont été soumises à deux techniques de séchage différentes : étuve (40,60, 80,100 et 120°C) et micro-ondes (100,300, 500 700 et 900 W). Les effets des deux procédés sur la variation des paramètres : cinétiques, la modélisation et la qualité phytochimique ont été étudiés. La variation des paramètres cinétiques ont montrés une réduction du temps et une vitesse de séchage ainsi qu'une diffusivité élevée ($0.96 \cdot 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$) ont été obtenus pendant le séchage par micro-ondes. La modélisation des données cinétiques effectuée sur 18 modèles empiriques nous a permis de choisir le modèle de Midilli et al. comme étant celui qui décrit le mieux la cinétique de séchage de la coriandre puisqu'il a présenté de meilleures performances prédictives avec $0.9961 < R^2 \text{ ajusté} < 0.9997$, $0,0001 < \chi^2 < 0,0004$, et $0,0061 < \text{RMSE} < 0,0312$. En ce qui concerne les composés bioactifs, les valeurs les plus élevées du contenu phénolique total (TPC) et des activités antioxydantes ont été observées lors du séchage par micro-ondes. En conséquence, le processus innovant de micro-ondes s'est avéré être la meilleure méthode pour le séchage des feuilles de coriandre.

Mots clés : Micro-onde, Etuve, Modèles mathématiques, Coriandre

Abstract

In this study, coriander leaves were subjected to two different drying techniques : oven (40,60, 80,100 and 120 °C) and microwave (100,300,500 700 and 900 W). The effects of the two processes on the variation of kinetic parameters, modelling and phytochemical quality were studied. The variation of kinetic parameters showed that the reduction of time and a high drying rate and diffusivity ($0.96 \cdot 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$) were obtained during microwave drying. Modeling of the kinetic data performed on 18 empirical models allowed us to select the model of Midilli et al. as the one that best describes the drying kinetics of coriander since it showed better predictive performance with $0.9961 < \text{fitted } R^2 < 0.9997$, $0.0001 < \chi^2 < 0.0004$, and $0.0061 < \text{RMSE} < 0.0312$. Regarding the bioactive compounds, the highest values of total phenolic content (TPC) and antioxidant activities were observed when microwave drying with. Accordingly, the innovative microwave process was found to be the best method for drying coriander leaves.

Key words: Microwave, Oven, Mathematical models, Coriander.

1. Introduction

L'élimination de l'humidité peut être due à un transfert simultané de chaleur et de masse (**Ertekin et Yildez., 2004**). Elle est réalisée dans le but de réduire l'eau à un niveau auquel les réactions d'altération et de détérioration microbiennes sont fortement réduites. Le produit séché obtenu minimisera les coûts et le temps de transport, de stockage et d'emballage. Bien qu'il existe de nombreuses façons de réaliser le séchage, le choix de la méthode dépend du matériau et du niveau sanitaire requis (**Kabiru et al., 2013**). L'utilisation du séchage des denrées alimentaires est très courante pour améliorer la stabilité des aliments et minimiser les changements chimiques et physiques pendant le stockage. Le séchage est donc la technique la plus utilisée pour la conservation des aliments (**Singh et al., 2014**).

De plus, il existe plusieurs types de techniques de séchage qui peuvent être appliquées pour réduire l'eau et atteindre l'objectif de conservation des aliments, comme l'ont montré **Singh et al. (2014)** et **Inyang et al., (2017)**, notamment le séchage à l'air chaud, le séchage au soleil, le séchage osmotique, le séchage à l'infrarouge, le séchage au four, le séchage par pulvérisation, le séchage au tambour, le séchage par micro-ondes, le séchage par congélation, le séchage sous vide, le séchage par tapis de mousse, le séchage par impact, le séchage acoustique, le séchage par explosion, les séchoirs hybrides.

La plupart des traitements thermiques conventionnels comme le séchage à l'air chaud, le séchage sous vide, le séchage au soleil et la lyophilisation entraînent de faibles taux de séchage dans la période de chute, ce qui entraîne des produits finis indésirables (**Mousa et Farid, 2002**). En plus de sa longue durée, le séchage au soleil n'est pas recommandé du point de vue de l'hygiène. Ils ont également des inconvénients tels que des normes de qualité, des problèmes de contamination, une faible efficacité énergétique et des coûts élevés, ce qui n'est pas une situation désirable en industrie alimentaire (**Soysal et Öztekin, 2001**).

Le séchage par micro-ondes, qui est effectué pendant une période de temps relativement courte, peut-être une meilleure alternative à la méthode traditionnelle de séchage à l'air chaud. En plus du coût énergétique inférieur encouru dans le séchage par micro-ondes, le processus s'est également avéré plus rapide par rapport au traitement de séchage à l'air chaud conventionnel (**Zhang et al., 2016**).

La modélisation des cinétiques est très utile dans les processus alimentaires. Les processus concernés sont principalement des réactions bio-chimiques et physiques. Ces

changements se déroulent à un certain rythme et avec une certaine cinétique. La modélisation cinétique nous permet de décrire ces changements et leurs vitesses de manière quantitative. La modélisation cinétique est un outil puissant qui peut aider à démêler les mécanismes de réaction de base. La compréhension des mécanismes de base est essentielle pour la modélisation et le contrôle de la qualité (Boekel *et al.*, 2001).

Par conséquent, les objectifs de la présente partie de la thèse étaient de :

(a) Déterminer les effets des différentes températures et des différents niveaux de puissance du séchage sur les différents paramètres de qualité du séchage et examiner les résultats de l'analyse. et (b) la comparaison de plusieurs équations de séchage pour exprimer la cinétique du séchage des feuilles de coriandre avec le modèle de séchage le plus approprié.

2. Matériel et méthodes

2.1. Matériel végétal

L'échantillonnage a été effectué au mois de Septembre 2016, d'une manière aléatoire dans la région de Bejaia. Au laboratoire, les feuilles fraîches de la coriandre ont été séparées de leurs tiges puis lavées avec l'eau distillée pour se débarrasser de toutes les impuretés. Leurs épaisseurs ont également été mesurée à l'aide d'un pied à coulisse, et la moyenne s'est avérée être de $0,30 \pm 0,01$ mm.

2.2. Processus de séchage et cinétiques expérimentales de séchage

Pour déduire la teneur en humidité des feuilles de coriandre, deux méthodes de séchage ont été appliquées, à savoir le séchage thermique conventionnel dans une étuve ventilée et le séchage innovant par micro-ondes. Les échantillons ont été séchés dans une étuve réglée à environ 105 °C jusqu'à la stabilité du poids. La teneur initiale d'humidité a été calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$\text{Moisture content (per cent db)} = \frac{w_1 - w_2}{w_2} \times 100 .$$

Ou :

w_1 : Poids initiale de l'échantillon en g;

w_2 : Poids finale de l'échantillon en g.

(34)

2.2.1. Procédé de séchage par étuve ventilée

Une quantité de 10g de feuilles ont été séchés par étuve a différentes températures (40, 60, 80, 100,120°C).

Afin de déterminer la teneur en eau des échantillons, les feuilles ont été séparées de leurs tiges. Les cinétiques de séchage ont été établies à partir des mesures de variation de masse des échantillons au fil du temps. Des précautions strictes ont été prises pour peser les échantillons pendant le séchage, et les mesures de poids ont été effectuées rapidement entre les expériences afin d'éviter toute interférence. Les poids initiaux et finaux des échantillons de feuilles de coriandre ont été déterminés à chaque intervalle de 15 minutes à l'aide d'une balance électronique de précision de 10^{-4} g, jusqu'à ce que le poids devienne constant. Les différents résultats ainsi obtenus ont permis de suivre l'évolution de la teneur en eau en fonction du temps. Le taux d'humidité est calculé à partir de l'équation. (34).

2.2.2. Processus de séchage par micro-ondes

Le traitement de séchage a été effectué dans un four à micro-ondes numérique domestique (NN-S674MF, Kuala Lumpur, Malaisie) dont les caractéristiques techniques sont (230 V, 50 Hz et 2450W) avec une cavité de dimension 34,5cm × 34,0cm × 22,5cm et capable de générer une puissance de 720 à 2450 MHz a été utilisé pour sécher les feuilles de coriandre. Le four à micro-ondes était composé d'une plaque de verre rotative de 300 mm de diamètre à la base du four. L'appareil était équipé d'un système de contrôle numérique du temps d'irradiation et de la puissance des micro-ondes (cette dernière étant réglable linéairement de 100 à 900 W). Le four à micro-ondes était actionné par un terminal de commande, qui pouvait contrôler le niveau de puissance des micro-ondes et le temps d'émission. Cinq puissances micro-ondes différentes (100, 300, 500, 700 et 900 W) ont été utilisées.

La méthode de mesure consiste à suivre la perte de masse en utilisant une balance électronique à affichage numérique, de précision 0,001 g placée juste à côté de l'appareil, jusqu'à obtention d'un poids constant afin de suivre les cinétiques de séchage. La perte de poids (%) a été calculée en utilisant l'équation 34.

2.2.3. Modélisation mathématique des courbes de séchage

Le lissage des courbes de séchage permet de décrire les courbes expérimentales à l'aide de courbes théoriques et d'identifier certains paramètres utiles. Dix-huit modèles, dont les équations sont présentées au **tableau 6**, ont été testés pour le lissage des courbes de séchage, afin de déterminer le modèle le plus approprié pour décrire le comportement de séchage des feuilles de coriandre. Tous ces modèles estiment que les courbes de séchage peuvent être représentées par une équation du taux d'humidité en fonction du temps de séchage. Le taux d'humidité (MR) a été calculé comme suit :

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

(35)

Dans lequel :

MR= taux d'humidité

M_t = la teneur en eau à un moment spécifique

M_0 = la teneur en eau initiale

M_e =la teneur en eau à l'équilibre.

❖ Humidité basée sur le poids humide

$$MC_{w.b.} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \quad (36)$$

❖ Humidité sur la base du poids sec

$$MC_{d.b.} = \frac{MC_{w.b.}}{100 - MC_{w.b.}} \times 100 \quad (37)$$

Dans lesquels ;

MC_{w.b.} = pourcentage d'humidité en fonction de l'humidité

MC_{d.b.} = pourcentage d'humidité sur base sèche ;

m₁ = poids de l'échantillon avant séchage (g) ;

m₂ = poids de l'échantillon après séchage (g).

Le tableau 06 représente les 18 modèles de couches minces utilisés.

Tableau 6: Modèles à couches minces pour le séchage des fruits et légumes

N°	Equations	Nom du modèle	Références
1	MR = exp (-kt)	Newton	Westerman <i>et al.</i> , 1973
2	MR=a*exp(-kt)	Henderson and Pabis	Henderson, Pabis, 1961
3	MR=a*exp(-kt) +c	Logarithmic	Toghrol andPahlevan, 2004
4	MR=a*exp(-kt)+(1-a)exp(-kbt)	Approximation of diffusion	Yaldyz and Ertekyn, (2007)
5	MR = exp (-kt ⁿ)	Page	Page, 1949
6	MR = a exp (-kt) +b	Midilli et al.	Akpinar <i>et al.</i> , 2003
7	MR = a exp (-k ₁ t)+b exp (- k ₂ t)	Two Term model	Glenn, 1978
8	MR = a exp (k ₀ t)+ (1-a)exp(-k ₁ at)	Two Term Exponential	Yaldiz <i>et al.</i> , 2001
9	MR = a exp (k ₁ t ⁿ) +b exp (-k ₂ t ⁿ)	Hii and others	Kumar <i>et al.</i> , 2012
10	MR = a exp (-kt) ⁿ +b	Demir and others	Demir <i>et al.</i> , 2007

11	$MR = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-gt)$	Verma and others	Verma <i>et al.</i> , 1969
12	$MR = \exp(k_1 t/1+k_2 t)$	Aghbashlo and others	Aghbashlo <i>et al.</i> , 2008
13	$MR = 1 + at + bt^2$	Wang and Singh	Ozdemir <i>et al.</i> , 1992
14	$\ln(-\ln MR) = a + b(\ln t) + c(\ln t)^2$	Diamante and others	Diamante <i>et al.</i> , 2010
15	$MR = \alpha - b \exp(-k_0 t^n)$	Weibull	Corzo <i>et al.</i> , 2008
16	$t = a \ln(MR) + b [\ln(MR)]^2$	Thompson	Thompson <i>et al.</i> , 1968
17	$MR = \exp(-at - b\sqrt{t})$	Silva and others	Silva <i>et al.</i> , 2012
18	$MR = 1 - t/(a + bt)$	Peleg model	Khazaei and Daneshmandi, 2007

Note: k : coefficient de séchage (1/min) ;
a, b, c : sont les coefficients des équations ; n : est l'exposant.

La modélisation du comportement de séchage de divers produits nécessite souvent l'utilisation des méthodes statistiques d'analyse de régression et de corrélation. (Akpinar, 2006). C'est pourquoi une analyse de régression non linéaire a été réalisée à l'aide du logiciel Statistica (version 8) et la qualité de l'ajustement des modèles testés par rapport aux données expérimentales a été évaluée et comparée à l'aide de trois paramètres statistiques, à savoir le coefficient de détermination ajusté (R^2 ajusté), le chi-deux (χ^2), et l'erreur quadratique moyenne (RMSE).

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N - z} \tag{38}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N}} \tag{39}$$

où : $MR_{exp,i}$ et $MR_{pre,i}$ sont, respectivement, le taux d'humidité expérimental et le taux d'humidité prédit, N est le nombre d'observations et z est nombre de paramètres constants dans l'équation du modèle.

2.2.4. Le coefficient de diffusion effective (D_{eff})

La diffusion dans les solides au cours du séchage est un processus complexe qui peut faire intervenir plusieurs phénomènes, tels que la diffusion moléculaire, l'écoulement capillaire, l'écoulement de Knudsen, l'écoulement hydrodynamique ou la diffusion de surface. Tous ces phénomènes sont combinés en un seul terme appelé diffusivité effective de l'humidité (D_{eff}) (**Erbay et Icier, 2010**). Pour un matériau en feuille, la diffusivité d'humidité effective est calculée comme suit (**Demirhan et Özbek, 2011**) :

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} e^{\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right)}$$

(40)

D_{eff} : est la diffusivité effective de l'humidité (m^2/s) ;

L : est la demi-épaisseur (séchage des deux côtés) des feuilles de coriandre ; n

:est un entier positif et t est le temps de séchage (s).

Pour une période de séchage plus longue, l'équation mentionnée ci-dessus peut être simplifiée au seul premier terme de la série et peut être écrite sous forme logarithmique comme suit (**Kumar, Sarkar, & Sharma, 2011**) :

$$\ln(MR) = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}$$

(41)

L'équation ci-dessus est évaluée numériquement pour le nombre de Fourier, $F_0 = D_{eff} * t / 4L^2$ (**Darvishi et al., 2014**), pour cela, l'équation (41) peut être réécrite comme suit :

$$\ln(MR) = \ln \frac{8}{\pi^2} - \pi^2 F_0$$

(42)

Ainsi :

$$F_0 = -0.101 \ln(MR) - 0.0213 \quad (43)$$

La diffusivité effective de l'humidité a été calculée comme suit :

$$D_{\text{eff}} = \frac{F_0}{\left(\frac{t}{4L^2}\right)} = \frac{-0.101 \ln(MR) - 0.0213}{\left(\frac{t}{4L^2}\right)} \quad (44)$$

2. 3. Qualités phytochimiques

2. 3.1. Extraction et détermination des composés phénoliques totaux

Les composés phénoliques totaux ont été extraits selon la méthode de **Dahmoune *et al.* (2013)**. 1 g de poudres broyées a été mélangée avec 60 ml d'un mélange de 50 % d'éthanol et de 50 % d'eau (v/v).

L'extraction a été réalisée à l'aide d'un système de four à micro-ondes domestique (400W et 123s pour la puissance des micro-ondes et le temps d'extraction, respectivement). Le mélange a ensuite été centrifugé à 6000 tours pendant 15 min et le processus a été répété deux fois. Après centrifugation, les surnageants ont été récupérés et filtrés et conservés aux réfrigérateur avant analyse.

Ensuite, la teneur en polyphénols a été quantifiée à l'aide du réactif de Folin- Ciocalteu, en référence à la méthode décrite par **Singleton et Rosi, (1965)**. Le réactif utilisé est constitué d'un mélange d'acide phosphotungstique et d'acide phosphomolybdique de couleur jaune. Le principe de la méthode est basé sur l'oxydation des composés phénoliques par ce réactif, qui entraîne la formation d'un nouveau complexe d'oxydes métalliques de tungstène et de molybdène de couleur bleu. L'intensité de la coloration bleue produite est proportionnelle à la quantité de polyphénols présents dans l'extrait.

Un volume de 500 µl d'extrait dilué est ajouté à 2,5 ml du réactif Folin–Ciocalteu (10%), puis un volume de 2 ml de la solution de carbonate de sodium (7,5%) est ajouté après que le mélange ait été laissé à 27 °C dans l'obscurité pendant 2 min. La lecture de l'absorbance est effectuée à une longueur d'onde de 760 nm après 15 min incubation. La teneur en polyphénols est calculée en se référant à une courbe d'étalonnage réalisée avec de l'acide gallique et les résultats sont exprimées en milligramme équivalent d'acide gallique par gramme de poudre (mg EAG/ g).

2.3.2. Flavonoïdes totaux

Les flavonoïdes totaux ont été dosés en utilisant l'une de leurs propriétés structurales ; Les flavonoïdes possèdent un groupement hydroxyle (OH) libre, en position 5 qui est susceptible de donner avec le groupement CO, un complexe coloré avec le chlorure d'aluminium. Les flavonoïdes forment des complexes jaunâtres par chélation des métaux (fer et Aluminium). Ceci traduit le fait que le métal (Al) perd deux électrons pour s'unir à deux atomes d'oxygène de la molécule phénolique agissant comme donneur d'électrons (**Ribereau- Gayon, 1968**).

La teneur en flavonoïdes est déterminée selon la méthode de **khennouf et al. (2010)**. Un volume de l'extrait dilué est mélangé avec un volume de chlorures d'Aluminium (AlCl₃) à 2%, Après 10 min d'incubation à l'obscurité et à température ambiante, l'absorbance est mesurée à 430 nm par un spectrophotomètre UV-visible (UV-mini 1240, Shimadzu, Japan). Les concentrations des flavonoïdes contenus dans l'extrait ont été calculées en se référant à la courbe d'étalonnage obtenue en utilisant la quercétine comme standard et Les résultats sont exprimés en mg d'équivalent quercétine (mg EQ par 100 g).

2.4. Evaluation de l'activité antioxydante

2.4.1. Activité anti-radical DPPH

L'évaluation du pouvoir antioxydant des différents extraits est réalisée par le test DPPH qui est considéré comme un radical libre relativement stable. Le principe de cette méthode est basé sur la mesure du piégeage des radicaux libres de DPPH (1,1-Diphényle-2- picryl-hydrazyl de couleur violette). En présence de molécules dites antioxydants, le DPPH est transformé en sa forme réduite non radicalaire (diphényle picryl-hydrazine : de couleur jaune), ce qui conduit à une diminution de l'absorbance (Mansouri et al., 2005). La décoloration du DPPH est directement proportionnelle à la capacité des molécules bioactives à le réduire.

Le protocole expérimental utilisé est celui de **Brand-Williams et al. (1995)**, qui consiste à mélanger 100 µl de l'extrait éthanolique avec 1 ml de de DPPH° (60 µM). La lecture de l'absorbance est faite à 517 nm après 30 mn d'incubation dans l'obscurité. Les résultats sont exprimés en pourcentage de réduction du radical DPPH° par rapport à un témoin selon la formule suivante :

$$\% \text{Inhibition} = \frac{A_{\text{control}} - A_{\text{sample}}}{A_{\text{control}}} \times 100$$

(45)

A_{control} : absorbance du témoin contenant l'acétone 60%. A_{sample} : absorbance de la solution contenant l'échantillon.

2.4.2. Pouvoir réducteur

Cette méthode est basée sur la capacité des composés réducteurs, à réduire le fer ferrique (Fe^{3+}) du ferrocyanure de potassium pour donner du fer ferreux (Fe^{2+}). La réaction est révélée par le virement de couleur jaune de (Fe^{3+}) en couleur bleu vert de (Fe^{2+}). l'absorbance est mesurée à 700 nm (**Oyaizu, 1986**). Une augmentation de l'absorbance correspond à une augmentation du pouvoir réducteur des extraits testés (**Hubert, 2006**).

Un millilitre de l'extrait à différentes concentrations est mélangé avec 2,5ml d'une solution tampon phosphate 0,2 M (pH 6,6) et 2,5ml d'une solution de ferricyanure de potassium $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ à 1%. L'ensemble est incubé au bain-marie à 50°C pendant 20 min ensuite, 2,5ml d'acide trichloracétique à 10% sont ajoutés pour stopper la réaction. Les tubes sont centrifugés à 3000 rpm pendant 10min. Un aliquote (2,5ml) de surnageant est combinée avec 2,5ml d'eau distillée et 0,5ml d'une solution aqueuse de FeCl_3 (Chlorure ferrique). La lecture de l'absorbance du milieu réactionnel se fait à 700 nm contre un blanc semblablement préparé, en remplaçant l'extrait par de l'eau distillée qui permet de calibrer l'appareil (spectrophotomètre UV-VIS).

Une augmentation de l'absorbance correspond à une augmentation du pouvoir réducteur des extraits testés (**Singleton et Rossi, 1965**).

2.5.1. Analyse statistique

Toutes les données obtenues représentent la moyenne de 3 essais, et les données expérimentales ont été exprimées sous forme de moyennes \pm écart-type. Les comparaisons statistiques ont été effectuées à l'aide de l'analyse de la variance (ANOVA).

Les valeurs moyennes sont comparées en utilisant le test ppds (plus petites déférence significative) de Fisher au seuil d'erreur 5%. Toutes les analyses statistiques sont réalisées à l'aide d'un logiciel Infostat.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Taux d'humidité

La détermination du taux d'humidité des feuilles de la coriandre est très importante pour prévoir le rendement après séchage. En effet, le taux d'humidité conditionne les paramètres de conservation de la coriandre pour éviter d'éventuelles pertes économiques et nutritionnelles causées par des altérations microbiennes et/ou des activités enzymatiques des poudres conservées. Le taux d'humidité des feuilles de la coriandre est de $81\% \pm 0,055$ (wb).

Les cellules végétales possèdent de l'eau qui est une source de dégradation des polyphénols par oxydation (**Ribereau-gayon, 1968**). Pour éviter cette dégradation, on procède à un séchage pour éliminer l'eau, tout en préservant la composition chimique des cellules. Le séchage inhibe aussi les enzymes existantes dans le matériel végétal frais (la polyphénol oxydase) (**Tomas-Babera et Espin, 2001**).

3.2. Evaluation des courbes de séchage

3.2.1. Cinétiques de séchage par étuve

Le séchage a une importance majeure pour l'extraction des polyphénols, car les cellules végétales contiennent différents types d'enzymes, susceptibles de provoquer des modifications des composés phénoliques contenus dans le matériel végétal, en particulier des polyphénols- oxydases et des glycosidases. Un taux élevé d'eau, a une grande importance pour l'extraction des polyphénols, car sa présence est un élément gênant du rendement de l'extraction. Cet inconvénient peut être éliminé par un séchage rapide du matériel végétal, aussitôt après sa récolte (**Ribéreau-Gayon, 1968**). Le matériel végétal séché peut être conservé pendant un certain temps sans modifications importantes (**Owen et Johns, 1999**).

Pour étudier l'effet du séchage par étuve, cinq températures de 40, 60, 80, 100, 120 ° C ont été utilisées pour sécher la coriandre. Les pertes de poids des échantillons pendant le séchage sont données dans **la figure 08** et la perte en teneurs en humidité est donnée dans **la figure 09**. Les courbes de séchage ont été préparées sur la base des pertes en eau du produit en fonction du temps (min).

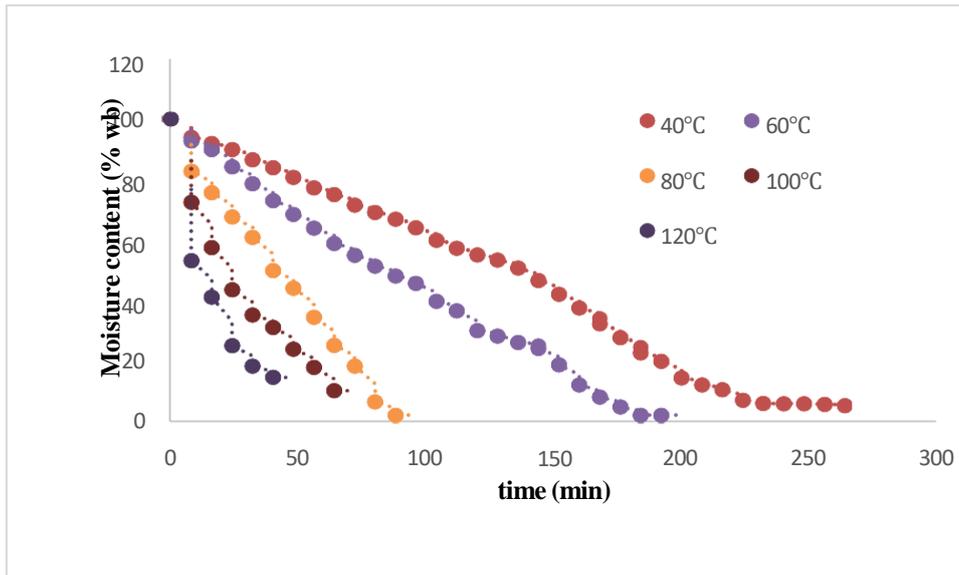


Figure 8: Effets de la température de séchage sur la teneur en d'humidité des feuilles de coriandre.

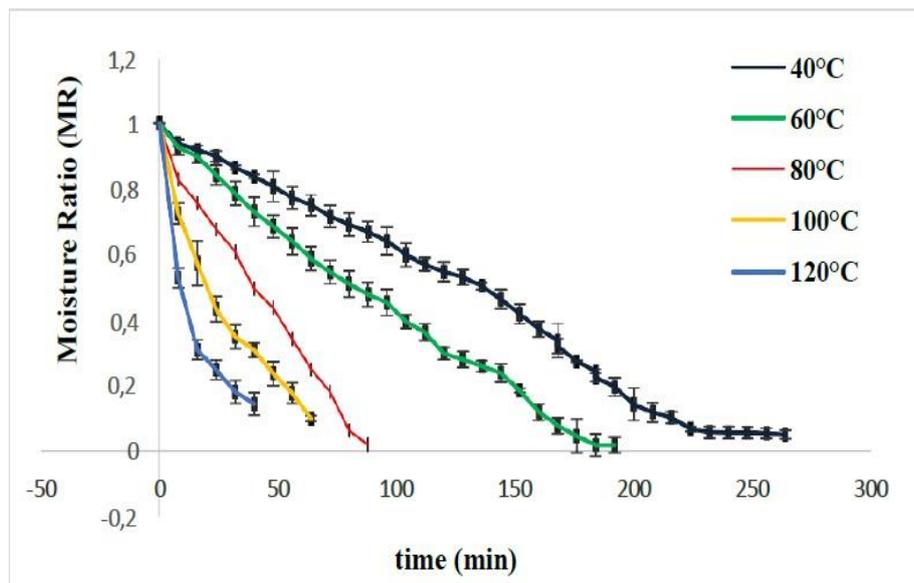


Figure 9 : Courbes du taux d'humidité des feuilles de coriandre séchées par étuve à différentes températures.

La teneur en humidité initiale des feuilles de coriandre avant le séchage était d'environ $81 \pm 0,4$ %. Comme prévu, la température de séchage a eu un effet significatif sur les caractéristiques de séchage des feuilles de coriandre. La teneur en humidité a diminué continuellement avec le temps et une augmentation de la température a permis de réduire le temps de séchage. . Les temps de séchage les plus longs et les plus courts ont été enregistrés à 40°C (40 min) et 120°C (264 min), respectivement. Le temps nécessaire pour réduire la

teneur en eau des feuilles de coriandre de $81 \pm 0,4$ % (w.b.) à $56 \pm 0,2$ % (w.b). ont été de 264, 192, 88,64 et 40 min à 40°C, 60°C, 80 et 120°C, respectivement, 60°C, respectivement, comme le montre les figure 8.

La figure 9 montre le taux d'humidité des feuilles de coriandre en fonction du temps de séchage. D'après cette figure, il est clair que le taux d'humidité diminue considérablement avec l'augmentation du temps de séchage. Le temps nécessaire pour réduire le taux d'humidité à un niveau donné dépend de la température de séchage, étant le plus élevé à 120°C et le plus faible à 40°C. Il a été observé que le principal facteur influençant la cinétique du séchage était la température de séchage, comme cela a été noté dans d'autres études (**Belghit et al., 2000 ; Koulia et al., 2002**). Ainsi, une température de séchage plus élevée a produit un taux de séchage plus élevé et Par conséquent, la teneur en eau a diminué plus rapidement. Cela est dû à l'augmentation de l'enthalpie de l'air sur les feuilles de coriandre et à l'accélération subséquente de la migration de l'eau .

Cette perte de masse présente une allure générale décroissante tout au long du séchage des feuilles de coriandre. Il y a une relation inverse entre la température et le temps de séchage ; une augmentation de température entraîne une diminution du temps de séchage.

La coriandre est un produit qui ne présente pas la phase 0 et 1 lors du processus de séchage et présence uniquement de la phase 2 qui est la phase de séchage à allure décroissante, comme pour la majorité des plantes aromatiques et les produits alimentaires. Ce résultat est confirmé à la littérature (**Kouhila et al., 2002**). En effet, **Bimbenet et al. (1978)**, ont signalé que la période de mise en température disparaît pratiquement lorsque le produit est en particules ou en feuilles et que la période à allure constante n'est pas observée dans des nombreux cas lorsqu'il s'agit des produits végétaux. Ce comportement du produit au séchage est expliqué par la faible présence de l'eau à la surface pour qu'il soit porté par l'air, donc c'est la diffusion interne de l'eau qui est prépondérante.

Ce comportement a été décrit à la fois par **Doymaz et al. (2005)**, en étudiant le séchage des feuilles de menthe, et **Sharma et al. (2005)**, lors de l'étude de la cinétique de séchage de l'oignon.

Ces résultats sont en concordance à ceux rapportés par **Silva et al (2008)** quand ils ont étudié la cinétique de séchage de la feuille et de la tige de coriandre ; en outre, ces auteurs suggérés la diffusion en tant qu'étant le mécanisme principal de la migration de l'humidité dans le processus de séchage de la coriandre.

Des processus de séchage à la période de taux de chute ont été observés par **Silva et al. (2005) et Krokida et al. (2003)**, quand ils ont étudié la cinétique de séchage de la coriandre et d'autre légumes (potiron, carottes, pommes de terre, etc.), respectivement. En outre, ces auteurs suggérés la diffusion en tant qu'étant le mécanisme principal de la migration de l'humidité dans le processus de séchage de la coriandre.

Ahmed et al. (2001), ont étudiés le séchage des feuilles de coriandre par étuve ventilée à plusieurs températures 45, 50, 55, 60 et 65 °C, et ont enregistré des temps de séchage jusqu'à 4 heures presque similaires à ceux obtenus dans les gammes expérimentales utilisées dans cette étude. La chaleur causée par l'étuve générée à l'intérieur de l'échantillon fournissait un chauffage rapide et uniforme dans tout le produit, créant ainsi un important différentiel de pression de vapeur entre le centre et la surface du produit et permettant un transport et une évaporation rapides de l'eau.

Varith et al. (2003) ont également trouvés que le temps de séchage pour le séchage à l'air chaud diminué en augmentant la température. Des résultats similaires ont été trouvés par **Doymaz et al., 2002 ; et Vega et al ; 2012**).

La matière végétale s'échauffe en raison du transfert de chaleur de l'air à l'intérieur des feuilles de coriandre. Une fois que la pression de vapeur dans la coriandre est supérieure à celle de l'environnement, la matière végétale commence à perdre de l'humidité, mais à un rythme lent. Lorsque la température de l'air de séchage augmente, la vitesse de séchage augmente considérablement pendant la période de chauffage, le transfert de masse se produisant rapidement dans la température de l'air de séchage. La dernière période était la période où la teneur en eau diminuait (**Silva et al., 2005**).

3.2.2. Cinétique de séchage par microonde

Pour étudier l'effet du séchage par microonde, cinq températures puissances ont été utilisées pour sécher la coriandre. Les pertes de poids des échantillons pendant le séchage sont données dans **la figure 10** et la perte en teneurs en humidité est donnée dans **la figure 11**. Les courbes de séchage ont été préparées sur la base des pertes en eau du produit en fonction du temps (sec).

La figure 10 représente le taux d'humidité en fonction du couple temps-puissance du séchage par micro-onde. La durée du séchage est de 475, 105, 55, 40 et 35 sec respectivement à 100, 300, 500, 700 et 900 w.

La cinétique de séchage des feuilles de coriandre a montré que la teneur en humidité diminuait rapidement au début du processus de séchage par micro-ondes et ensuite, elle diminue moins progressivement jusqu'à la fin du séchage.

Les cinétiques de séchage montrent que la perte de masse de la coriandre est en fonction du couple temps-puissance du séchage par micro-onde. Le temps de séchage le plus long est attribué à la puissance 100 W, qui est de 7 min et 55s. Par contre, le laps de temps le plus court est obtenu lors de séchage à 700 W et à 900 W (la stabilité de la masse est atteinte à 40 et 35sec, respectivement). Les résultats obtenus montrent que la durée de séchage est inversement proportionnelle aux puissances de séchage, donc plus le niveau de la puissance est élevé, plus le temps de séchage est réduit. Par conséquent, le niveau de puissance des micro-ondes a un effet important sur le taux de séchage des feuilles de coriandres.

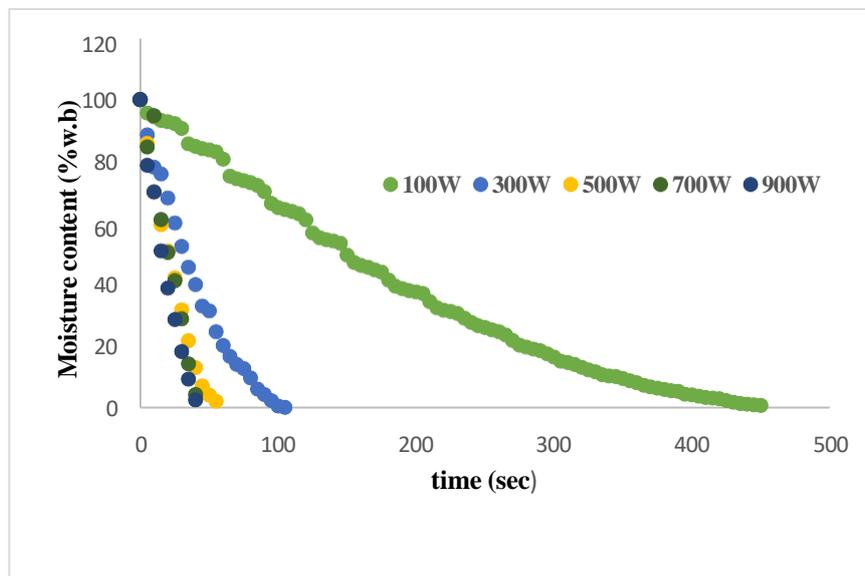


Figure 10 : Effet de la puissance du séchage sur la teneur en d'humidité des feuilles de coriandre.

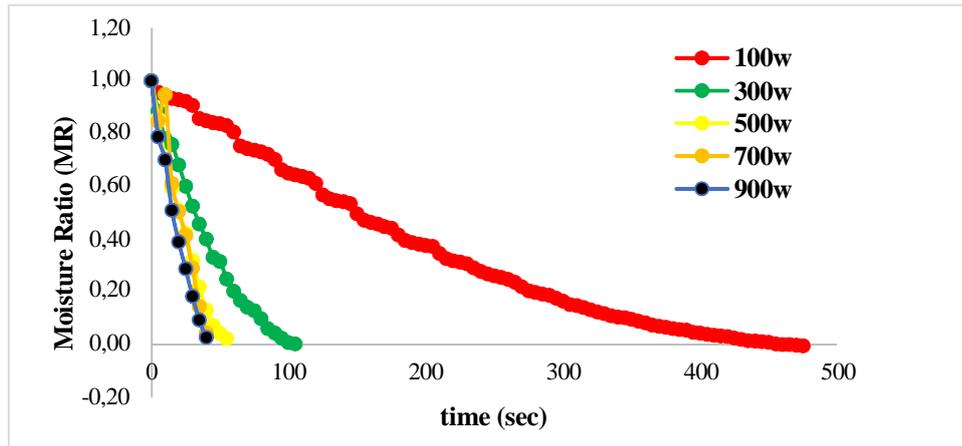


Figure 11 : Courbes du taux d'humidité des feuilles de coriandre séchées par micro-onde à différentes puissances.

L'humidité du matériau était très élevée pendant la phase initiale du séchage, ce qui a entraîné une plus grande absorption de la puissance des micro-ondes et un séchage plus élevé. Au fur et à mesure que le séchage progressait, la perte d'humidité dans le produit a entraîné une diminution de l'absorption de l'énergie micro-ondes, ce qui a entraîné une baisse de la vitesse de séchage. Les taux de séchage des feuilles de coriandre ont augmentés avec l'augmentation des niveaux de puissance des micro-ondes. Par conséquent, le niveau de puissance des micro-ondes a un effet positif sur les taux de séchage.

Plusieurs chercheurs ont signalé qu'une augmentation considérable de la puissance des micro-ondes entraîne une augmentation importante de la vitesse de séchage de divers légumes tels que les tranches d'haricot vert (**Doymaz et al., 2015**), les tranches de pommes (**Zarein et al., 2015**) et le kiwi (**Tian et al., 2015**). Cela pourrait être dû au fait qu'à des puissances plus élevées, plus de chaleur est générée dans l'échantillon, ce qui a pour effet de créer une grande différence de pression de vapeur entre le centre et la surface et la surface du produit (**Wang et al., 2005**).

Les résultats de cette étude sont en accord avec des études antérieures (**Sharma et Prasad, 2006, Soysal, 2004**). L'influence de la puissance sur les cinétiques de séchage peut s'expliquer par le fait que le transfert d'humidité au sein de l'échantillon de coriandre est plus rapide lorsque la puissance de chauffage microondes est plus élevée (**Chemat et al., 2008**). En effet, plus de chaleur est générée au sein de l'échantillon créant ainsi une différence de pression de vapeur d'eau plus grande entre le centre et la surface du produit. C'est ce fort gradient de pression qui serait à la base de l'élimination rapide de l'eau pour les puissances élevées (**Al-Harahsheh et al., 2009**). Et cela demeure ainsi jusqu'à ce que la

teneur en eau à la surface du produit diminue et devienne un facteur limitant du séchage, conduisant à son ralentissement (**Abbasi et Mowla, 2008**)

3.3. Comparaison entre le séchage par micro-onde et par étuve

En comparant les **4 figures (07 et 08, 9et 10)**, les courbes de séchage montrent que le séchage par micro-ondes est plus rapide que le séchage conventionnel. Le séchage par micro-ondes a été rapide pour atteindre l'humidité finale souhaitée et que l'utilisation des micro-ondes réduisait considérablement le temps.

Le principe utilisé pour le séchage par micro-onde est différent du séchage par étuve lors du séchage conventionnel, la chaleur était transférée à la surface du matériau par conduction, convection et/ou radiation, et conduite à l'intérieur par conduction thermique. Dans le cas du séchage par micro-ondes, les micro-ondes pénètrent dans le matériau et interagissent avec l'eau, qui est une source de chaleur. Comme les molécules d'eau sont dipolaires par nature, elles tournent en suivant le champ électrique qui alterne à très haute fréquence. Cette rotation produit une friction des molécules et génère de la chaleur à l'intérieur du matériau. Les aliments étant riches en eau, les micro-ondes peuvent générer une chaleur volumétrique importante. L'eau chauffée augmente le taux de diffusion et le gradient de pression, ce qui facilite l'évacuation de l'humidité de l'intérieur vers l'extérieur du matériau (**Curnutte, 1980**).

En raison du mécanisme de séchage conventionnel, la structure de surface du matériau est très importante avant et pendant le processus de séchage. Les fruits sont naturellement recouverts d'une cuticule composée d'un biopolymère, la cutine, et d'une cire intégrée, avec des cires épicuticulaires sur la surface extérieure, ce qui constitue la principale barrière à la perte d'eau dans les fruits et légumes (**Krajayklang et al, 2001**).

Avec les micro-ondes, les aliments sont chauffés principalement par la génération de chaleur au sein même de l'aliment. Ainsi, le temps nécessaire à l'aliment pour atteindre des températures élevées est réduit. L'air dans le four et le contenant alimentaire est réchauffé uniquement lorsqu'il reçoit la chaleur de l'aliment (**Harrison, 1980**).

Un autre facteur intervenant dans le traitement par micro-ondes, qui permet un séchage rapide, est l'augmentation de la taille des pores. Lorsque l'intérieur de l'aliment atteint le point d'ébullition de l'eau, l'humidité libre s'évapore à l'intérieur du produit, ce qui provoque un gradient de pression de vapeur qui expulse l'humidité de l'échantillon. La pression de vapeur développée à l'intérieur de l'échantillon alimentaire entraîne une augmentation de la taille des

pores, connue sous le nom d'effet de gonflement. L'augmentation de la taille des pores facilite la diffusion de l'humidité dans l'échantillon (**Mudgett, 1989**).

Le séchage par micro-ondes offre la possibilité de raccourcir le temps de séchage, de répartir l'énergie de manière homogène et d'améliorer la qualité finale des produits déshydratés. Les applications des micro-ondes pour le séchage offraient donc un avantage distinct, à savoir une absorption d'énergie proportionnelle à la teneur en humidité résiduelle.

3.4. Modélisation mathématique du processus de séchage

Le **tableau 7** présente les valeurs estimées des paramètres des différents modèles utilisés pour la représentation du séchage en couche mince des feuilles de coriandre à différentes températures et puissances. Les données MR obtenues au cours des essais de séchage ont été ajustées aux données des 18 modèles empiriques, énumérés dans le tableau 1, et les résultats ont été évalués sur la base des paramètres statistiques suivants : le coefficient de détermination ajusté (R^2), chi-deux (χ^2) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Les valeurs élevées de R^2 ajusté et les faibles valeurs du χ^2 et de la RMSE renvoient dans tous les cas à une bonne adéquation du modèle (**Kaveh et Amiri Chayjan, 2017**). A la fin de l'analyse de régression non linéaire des 18 modèles considérés dans cette étude, quatre modèles, à savoir Newton, Henderson et Pabis, Midilli *et al.* ainsi que le modèle logarithmique dont les résultats de leurs constantes et coefficients de séchage ainsi que leurs paramètres statistiques sont présentés dans le tableau 2 ont donné des R^2 ajustés élevés. Ces modèles semblent être les plus appropriées pour décrire les processus de séchage des feuilles de coriandre dans les conditions expérimentales étudiées. Dans tous les cas, les valeurs R^2 pour les modèles étaient supérieures à 0,95, ce qui indique un bon ajustement (**Doymaz et Ismail, 2011**).

Cependant, le modèle de Midilli et al. a donné des valeurs de R^2 ajustées comparativement plus élevées dans tous les cas, tandis que les valeurs de χ^2 et de RMSE étaient plus faibles. (il est déterminé que le R^2 ajusté, χ^2 et RMSE sont compris entre 0,9961 et 0,9997, de 0.0001 à 0.0004, et de 0.0061 à 0.0312, respectivement). On peut donc supposer que ce modèle caractérise mieux le comportement de séchage des feuilles de coriandre dans le séchage par convection et par micro-ondes. Plus particulièrement comme dans la présente étude, d'autres auteurs ont obtenu de bons résultats en appliquant ce modèle dans la cinétique de séchage de feuilles alimentaires : **Silva et al. (2008)** a trouvés des résultats similaires avec le séchage des feuilles et tiges de coriandre.

Ce modèle est également similaire au modèle de Henderson et Pabis avec l'ajout d'un terme empirique à "t" (Midilli *et al.*, 2002 ; Ghazanfari *et al.*, 2006 ; Doymaz, 2008). Le modèle de Midilli *et al.* a été utilisé avec succès pour étudier les caractéristiques de séchage de produits agricoles tels que les feuilles de sarriette (Arslan *et Ozcan*, 2012), le pourpier (Demirhan *et Ozbek*, 2010), et l'aubergine (Ertekin *et Yokohama*, 2010).

Demirhan *et Ozbek* (2011) ont déterminé que le modèle semi-empirique de Midilli *et al.* offrait une meilleure adéquation pour toutes les conditions de séchage appliquées aux feuilles de céleri séchées par micro-ondes, parmi les huit modèles utilisés par les autres chercheurs. Evin (2012) a constaté que les données expérimentales de perte d'humidité s'adaptaient aux 14 modèles de séchage en couche mince. Parmi les modèles proposés, le modèle Midilli représentait précisément le comportement de séchage par micro-ondes de *G. tournefortii*. Sarimeseli (2011) a constaté que les feuilles de coriandre ont été séchées par rayonnement micro-ondes et le Midilli *et al.* était le meilleur modèle parmi les six modèles de séchage en couche mince.

Les figure 12 et 13 montrent le tracé des données expérimentales avec celles prédites l'aide du modèle Midilli *et al.* pour les feuilles de la coriandre à 100°C et 700W respectivement.

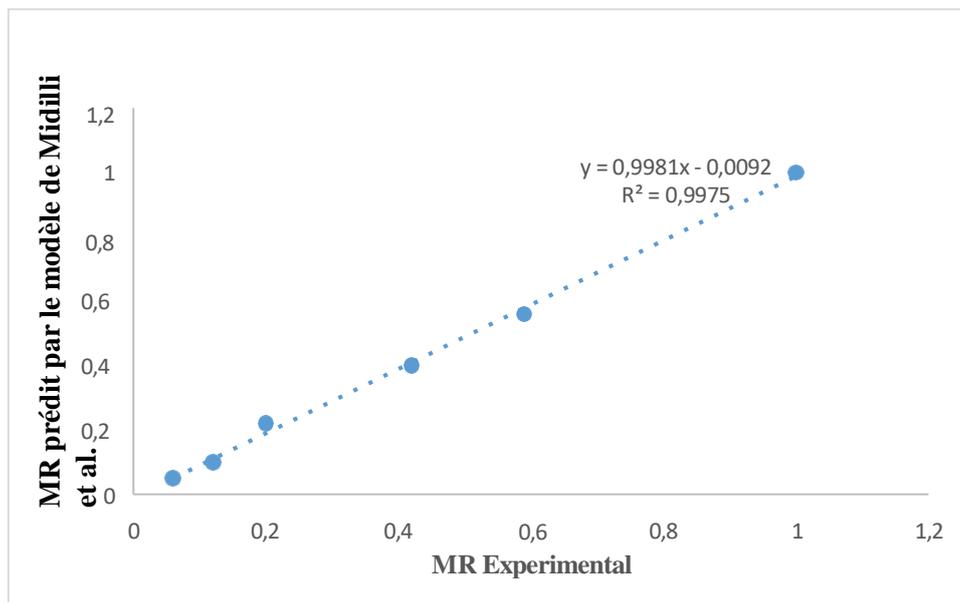


Figure 12 : MR prédit versus MR expérimental selon le modèle de Midilli *et al.* à 100°C

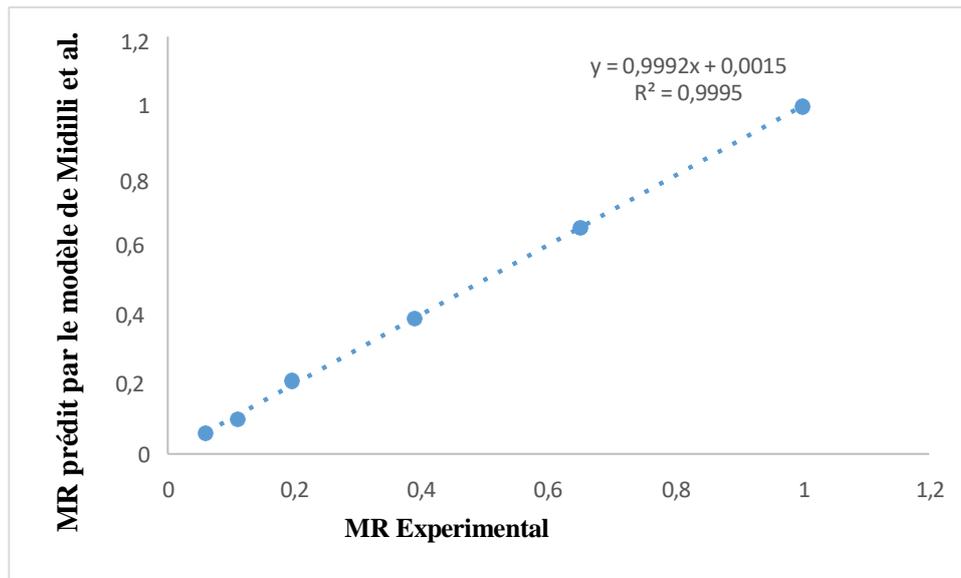


Figure 13 : MR prédit versus MR expérimental selon le modèle de Midilli et al. à 700W

D’après les résultats obtenus par les figures 12 et 13. Le diagramme de dispersion montre que les observations sont regroupées le long de la ligne linéaire, ce qui signifie que ce modèle est approprié pour décrire les caractéristiques de séchage des feuilles de coriandre avec un R^2 plus élevé avec le séchage par micro-onde. Des résultats similaires ont été rapportés par Goyal et al. (2006) pour les tranches de mangue brute, Doymaz et Ibrahim (2011) pour la cerise douce, Aghbashlo et al. (2009) pour les tranches de pomme de terre et Doymaz (2012) pour les tranches de kaki.

Les Résultats statistiques des différents modèles de séchage à l’étuve et microonde sont représentés dans le tableau 07

Tableau 7: Résultats statistiques des différents modèles de séchage à l’étuve et microonde.

Modèles	Conditions de séchage		Paramètres statistiques		
			R^2 Ajusté	χ^2	RMSE
Newton	OD	40°C	0.9926	0.0019	0.0269
		60°C	0.9925	0.0021	0.0265
		80°C	0.9961	0,0003	0.0145
		100°C	0,9912	0,0034	0.0278
		120°C	0,9934	0.0008	0.0254
	MD	100W	0.9985	0.0001	0.0156
		300W	0.9965	0.0005	0.0123
		500W	0.9920	0.0025	0.0265
		700W	0.9840	0.0064	0.0298
		900W	0.9871	0.0046	0.0277
		40°C	0.9926	0.0017	0.0256
		60°C	0.9825	0.0067	0.0302

Henderson and Pabis	OD	80°C	0.9798	0.0071	0.0327
		100°C	0,9991	0.0001	0.0045
		120°C	0,9985	0.0002	0.0064
	MD	100W	0.9963	0.0003	0.0152
		300W	0.9942	0.0006	0.0255
		500W	0.9906	0.0029	0.0152
		700W	0.9845	0.0056	0.0288
		900W	0.9773	0.0069	0.0348
Logarithmique	OD	40°C	0,9841	0.0059	0.0256
		60°C	0,9769	0.0074	0.0317
		80°C	0,9941	0.0005	0.0214
		100°C	0,9912	0.0028	0.0270
		120°C	0,9946	0.0006	0.0245
	MD	100W	0.9761	0.0066	0.0311
		300W	0.9769	0.0043	0.0297
		500W	0.9703	0.0063	0.0288
		700W	0.9845	0.0059	0.0263
		900W	0,9771	0.0076	0.0299
Midilli et al	OD	40°C	0.9988	0.0001	0.0065
		60°C	0.9979	0.0002	0.0191
		80°C	0.9961	0.0003	0.0287
		100°C	0,9991	0.0001	0.0061
		120°C	0,9978	0.0001	0.0231
	MD	100W	0.9992	0.0001	0.0069
		300W	0.9984	0.0002	0.0014
		500W	0.9956	0.0004	0.0312
		700W	0.9996	0.0001	0.0065
		900W	0.9968	0.0002	0.0132

Une étude expérimentale faite par **Darvishi et al. (2012)** sur la modélisation mathématique et cinétique de séchage des couches minces des tranches de carotte. Les résultats montrent que le modèle Midilli *et al*, 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 dex^2 et de RMSE.

3.5. Coefficients de diffusion effectifs (D_{eff})

La diffusivité effective de l'humidité des feuilles de coriandre a été décrite à l'aide des données de séchage. Les valeurs moyennes des diffusivités effectives mises en jeu au cours des deux processus de séchage des feuilles de coriandre sont illustrées dans **le tableau 8**.

En effet, lorsqu'on passe des températures ou des niveaux de puissance les plus bas aux plus élevés, les valeurs de D_{eff} montrent une variation allant de $0,04 \cdot 10^{-10}$ et $0,56 \cdot 10^{-10}$, et entre $0,14 \cdot 10^{-10}$ jusqu'à $0,96 \cdot 10^{-10}$ pour les différentes puissances.

D'après les résultats obtenus, il est évident que l'augmentation de la température et de la puissance a entraîné une augmentation du *Deff*. L'augmentation de l'énergie thermique résultant d'une augmentation de la puissance ou la température fait augmenter l'activité des molécules d'eau, ce qui entraîne une plus grande diffusivité d'eau ; Pour les deux procédés étudiés, les valeurs de *Deff* obtenues se situent dans la gamme de 10^{-8} - 10^{-12} m²/s pour les produits alimentaires et agricoles (Darvishi *et al.*, 2013 ; Sadi et Meziane, 2015).

Tableau 8: Valeurs des diffusions effectives obtenues pour la coriandre à différentes conditions de séchage.

Températures	(<i>Deff</i>) (m ² /sec)	Puissances	(<i>Deff</i>) (m ² /sec)
40°C	0,04.10 ⁻¹⁰	100W	0,07 .10 ⁻¹⁰
60°C	0,09.10 ⁻¹⁰	300W	0,14 .10 ⁻¹⁰
80°C	0,35.10 ⁻¹⁰	500W	0,48 .10 ⁻¹⁰
100°C	0,45.10 ⁻¹⁰	700W	0,67 .10 ⁻¹⁰
120°C	0,56.10 ⁻¹⁰	900W	0,96.10 ⁻¹⁰

3.6. Qualité phytochimique

Le séchage des échantillons laisse assurer une meilleure élimination de l'eau, tout en protégeant la composition en polyphénols. En outre, l'eau représente une source de dégradation de composés phénoliques par oxydation enzymatique telle que le polyphénolsoxydase qui modifie leurs structures (Tomas-Barberan et Espin, 2001).

Le tableau 09, regroupe la qualité phytochimique des feuilles de coriandre séchée par étuve et microonde.

Tableau 9: La qualité phytochimique des feuilles de coriandre séchée par étuve et microonde.

Techniques de séchage	PPT	Flavonoïdes	DPPH	Pouvoir réducteur
OD				
40°C	30,90±0,01 ^a	3,30±0,01 ^a	82,07±0,13 ^a	39,055±0,04 ^a
60°C	18,20±0,09 ^d	2,01±0,09 ^e	43,26±0,03 ^d	14,388±0,03 ^e
80°C	24,86±0,04 ^b	2,68±0,08 ^c	66,75±0,05 ^c	29,163±0,02 ^c
100°C	24,99±0,02 ^b	3,16±0,09 ^b	73,57±0,06 ^b	35,255±0,05 ^b
120°C	21,94±0,02 ^c	2,3±0,01 ^d	53,36±0,02 ^b	18,405±0,01 ^d
MD				
100w	44,94±0,04 ^b	2,32±0,05 ^b	80,88±0,05 ^b	56,26±0,09 ^b
300w	69,36±0,01 ^a	3,72±0,02 ^a	88,07±0,09 ^a	69,74±0,03 ^a
500w	23,44±0,04	0,51±0,03 ^e	50,41±0,06 ^e	30,11±0,05 ^e
700w	27,90±0,03 ^d	1,49±0,03 ^d	68,55±0,03 ^d	32,52±0,04 ^d
900w	39,62±0,12 ^c	2,02±0,04 ^c	71,01±0,07 ^c	43,21±0,12 ^c

Les valeurs sont exprimées sous formes de moyennes ± erreur standard. Les mêmes lettres indiquent que les valeurs moyennes ne sont pas significativement différentes à un niveau de confiance de 95% ($p \leq 0,005$).

3.6.1. Dosages des polyphénols totaux

Les teneurs en polyphénols totaux (PPT) des feuilles de la coriandre séchées à différentes températures de l'étuve et aux différentes puissances du micro-onde sont exprimées en mg équivalent d'acide gallique par g (mg EAG/g). Les résultats de ces teneurs sont illustrés dans le **tableau 9** et la **figures 14**.

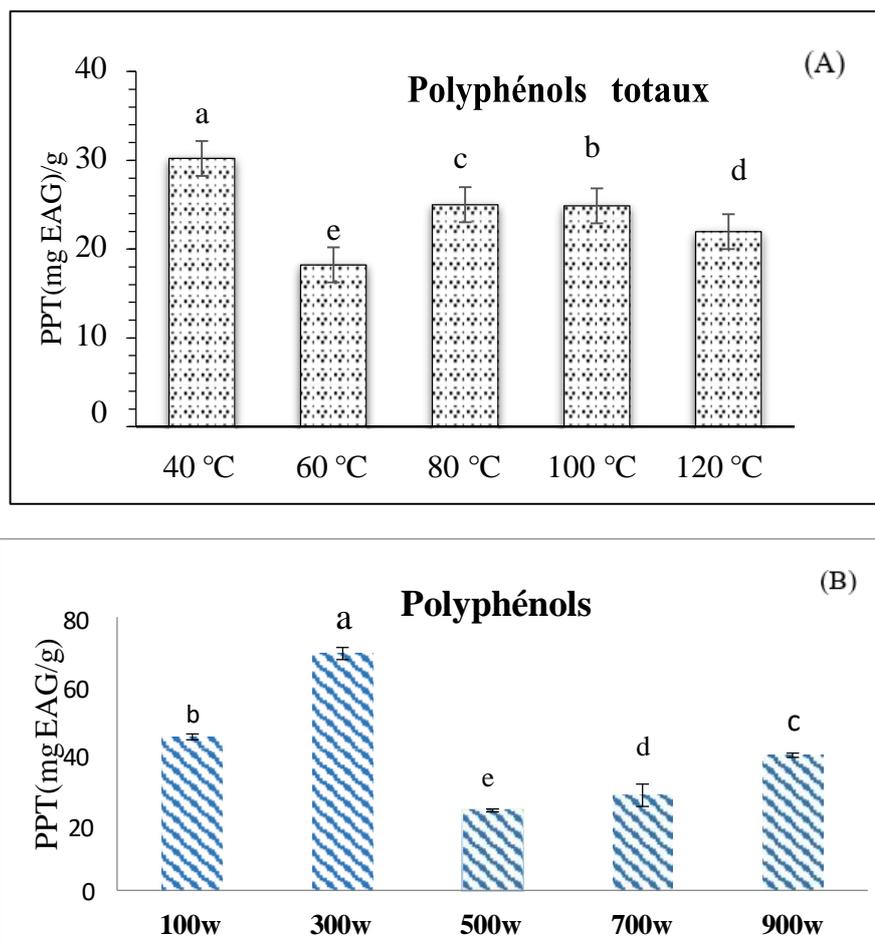


Figure 14: Effet du séchage conventionnel (A) et par micro-ondes (B) sur le contenu phénolique total des feuilles de coriandre.

Les résultats avec des lettres différentes pour la méthode de séchage conventionnelle ou par micro-ondes sont significativement différents à $p < 0,05$, avec $a > b > c > d > e$.

Pour le séchage conventionnel, les concentrations phénoliques variaient d'une température à l'autre et oscillaient entre $18,20 \pm 0,009^d$ et $30,90 \pm 0,001$ mg GAE/g. En effet, la teneur la plus élevée est attribuée à 40°C , suivi de 100°C puis 80°C . Par contre une faible teneur de $18,20 \pm 0,009^d$ mg EAG/g MS est obtenue à 60°C . Les différentes fluctuations sur le TPC peuvent être dues à la variation de la température utilisée par rapport au temps nécessaire au séchage. En effet, l'augmentation de la température de séchage peut réduire le temps d'exposition à la chaleur en raison du séchage rapide des feuilles mais, d'un autre côté, elle favorise également la dégradation des composés bioactifs. Les faibles teneurs à 60°C en composés phénoliques peuvent être dues à un effet de temps ou la température ou les deux en même temps (Klimczak *et al.*, 2007). L'efficacité d'extraction de ces composés peut être la cause de la différence des résultats Caliskan et polat (2011). L'efficacité d'extraction est directement liée à la polarité du solvant utilisé Ouchemoukh *et al.* (2012).

Lors de traitements à des températures (50-60°C) au cours des transformations industrielles, la structure phénolique des polyphénols peut être dégradée. De plus, les traitements thermiques peuvent conduire à la formation d'o-quinones et d'o-semi-quinones, molécules très réactives qui peuvent réagir avec des groupements nucléophiles des protéines et/ou des polysaccharides (**O'connell et Fox, 1999**). L'augmentation de la teneur en composés phénoliques à haute température (100°C) pourrait être due à l'inter conversion entre molécules phénoliques résultant de la disponibilité de précurseurs non enzymatiques de ces substances.

D'après les résultats du PPT obtenus par le séchage par micro-ondes. Les résultats montrent que la teneur en polyphénols totaux varie de 23,44 à 69,36 mg EAG/g de MS. En effet, la teneur la plus élevée est attribuée à 300 w (69,36±0,01^a mg EAG/g). L'augmentation de la TPC pour 300 W peut être due à l'augmentation de la pression de vapeur et de la température générées par les micro-ondes qui peuvent briser les parois cellulaires permettant la libération des composés phénoliques qui deviennent plus accessibles aux composés phénoliques qui deviennent plus accessibles pendant l'extraction (**Dong et al., 2019**).

Par contre une faible teneur de (23,44±0,03^d mg EAG/g MS) est obtenue à 500 w, il existe une augmentation du taux de composés phénoliques en augmentant la puissance du micro-onde jusqu'à 500W ou il existe une forte diminution puis il y'aura une augmentation à nouveau. Cette diminution peut être expliquée par la dégradation de ces composés par radiations et le temps de séjour des produits aux cours de séchage dans le four microonde qui sont des paramètres qui influencent sur la quantité des polyphénols totaux. Les effets du processus de séchage par micro-onde sur les substances phénoliques des aliments ont été étudiés, certains auteurs ont signalé qu'il ya un effet sur les composés phénoliques (**Akyildiz et al., 2004**) et certains ont déclaré qu'il n'y a pas un changement important sur la concentration de ces composés (**Dewanto et al., 2002**). l'augmentation de la puissance micro-ondes de 700 à 900 w améliore significativement la teneur en polyphénols qui peut être expliquer par augmentation de la perturbation du tissu végétal avec l'augmentation de l'intensité du champ micro-ondes , provoquant la libération de plus de composés phénoliques (**Hamrouni-Sellami et al., 2013**).

En effet le processus de séchage peut entraîner des niveaux élevés ou faibles de PPT selon le type de composés phénoliques présents dans le matériel végétal et leur emplacement dans la cellule (**Capecta et al., 2005**).

Selon **Inchuen et al. (2010)**, la faite d'avoir des meilleurs résultats avec le séchage par

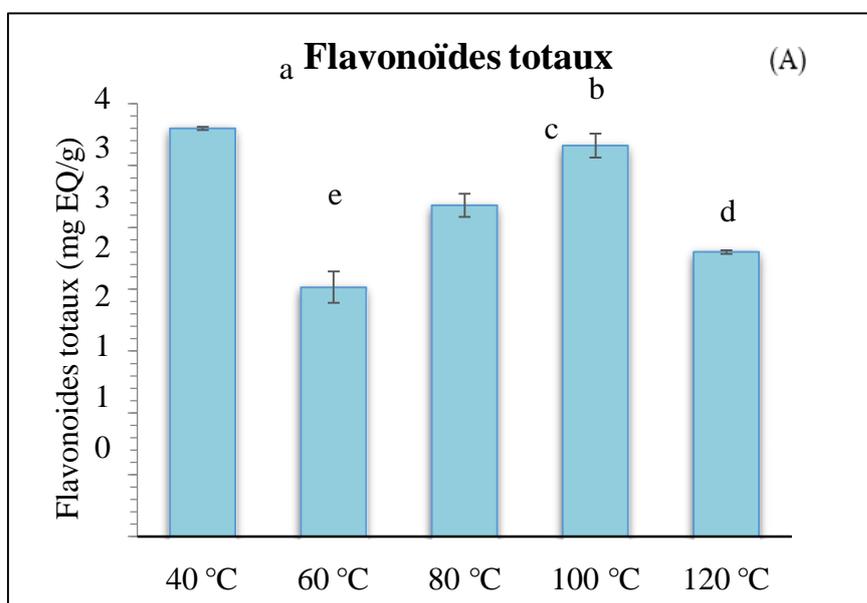
microonde peut être expliqué par le fait que la chaleur intense générée par les micro-ondes crée une pression de vapeur et une température élevées à l'intérieur des tissus végétaux. Par conséquent, dans certains cas, des composés phénoliques de parois cellulaires ou des composés phénoliques de liaison pourraient être libérés, entraînant ainsi l'extraction de plus de composés phénoliques.

3.6.2. Flavonoïdes totaux

Les résultats de la contenance en flavonoïdes obtenues pour les différents extraits de coriandre séchées par étuve et microondes sont représentés dans le **tableau 11** et les **figures 15 (A) et (B)**.

La teneur en flavonoïdes totaux de chaque extrait des feuilles de coriandre a été calculée à partir de la courbe d'étalonnage et exprimée en milligramme équivalent quercétine par gramme de poudre. On remarque d'après tous nos résultats, que les teneurs varient selon le temps de séchage. L'analyse statistique montre que les extraits présentent des différences significatives ($p < 0.05$). A l'analyse de la figure 14 (A), il ressort que la teneur en flavonoïdes est significativement influencée par la température. La teneur en flavonoïdes la plus élevée est $3.3 \pm 0,01 \text{ mg Eq Q/g MS}$, qui est obtenue à la température de séchage de 40°C , suivi par la température à 100°C ($3.16 \pm 0,09 \text{ mg Eq Q/g MS}$). Par contre, les faibles teneurs sont attribuées aux températures de séchage 120°C ($2.3 \pm 0,01 \text{ mg EQ/g MS}$) et de 60°C ($2.01 \text{ mg Eq EQ/g MS}$).

Selon **Schieber (2001)**, la perte de macromolécules comme les flavonoïdes pendant le traitement thermique peut être dû aux conditions de séchage sévères, en particulier, la température et la durée utilisée ce qui explique la faible teneur en flavonoïdes au séchage à 120°C .



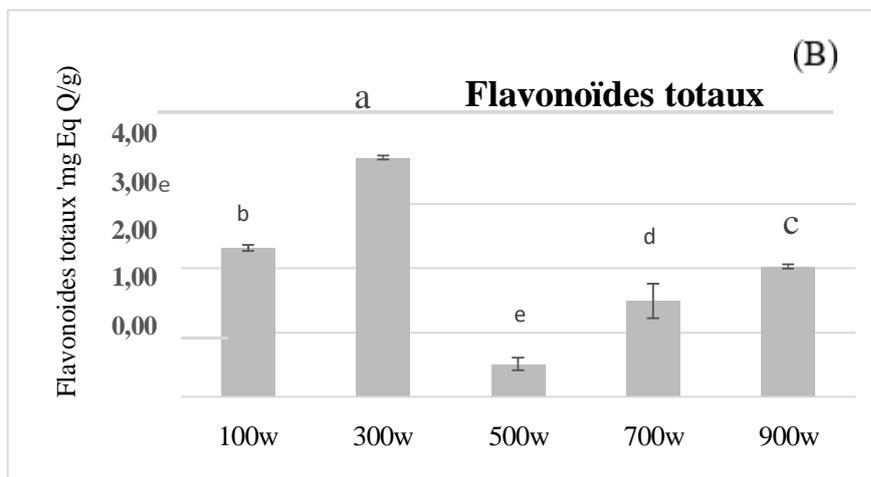


Figure 15 : Effet du séchage conventionnel (A) et par micro-ondes (B) sur le contenu en flavonoïdes des feuilles de coriandre.

A l'analyse de **la figure 15 (B)**, il ressort que la teneur en flavonoïdes est significativement influencée par puissance. D'après Les résultats, on remarque que la teneur en flavonoïdes augmente de 100W à 300W pour atteindre une valeur maximale de $(3,72\pm 0,05^a$ mg Eq Q/g) à 300 W. La teneur la plus faible est obtenue par la puissance 500w avec une teneur en flavonoïdes de $0,51\pm 0,03^e$ plus L'analyse statistique montre que les extraits séchés par microonde présentent des différences significatives ($p < 0.05$).

Selon **Toor et Savag, (2006)**, ces résultats peuvent être due à la pénétrabilité des rayonnements micro-ondes, provoque la dégradation des constituants cellulaires, rendant les flavonoïdes plus accessibles pendant l'extraction. Par contre une diminution est observée à 500,700 w et 900 w pour atteindre une valeur minimale de 0.5mg Eq AG/100g à 500 W. Cette diminution peut être expliquée par la dégradation des flavonoïdes par les fortes puissances de séchage par microonde, et voir même le type des flavonoïdes présent dans la coriandre. 900 w et air libre n'ont montré aucune différence significative ($p < 0.05$) en termes de teneur totale en flavonoïdes.

3.7. Les activités antioxydantes

Les activités antioxydantes de piégeage des radicaux sont très importantes en raison du rôle délétère des radicaux libres dans les aliments et dans les systèmes biologiques. Diverses méthodes sont actuellement utilisées pour évaluer l'activité antioxydante des composés phénoliques végétaux. Les extraits de feuilles de la coriandre obtenus par micro- ondes ont été comparés à ceux obtenus par séchage conventionnel. Le DPPH et l'activité réductrice du fer

sont les deux méthodes utilisées pour mesurer la capacité antioxydante. Par conséquent, la mesure de la capacité antioxydante pourrait être un indicateur utile de la perte d'antioxydants en fonction de la méthode de séchage .

3.7.1. Piégeage du radical DPPH

La capacité de réduction du radical DPPH induite par les antioxydants extraits des coriandres séchées par l'étuve et microonde sont représentés dans le tableau 04 et la figure 16 (A), la capacité antioxydante des composés phénoliques est associée à la disponibilité de ces derniers, qui agissent en tant que piègeurs des radicaux pour les donneurs d'hydrogène (**Proestos et al., 2013**). Selon les résultats obtenus de la Figure 16(A), le pouvoir anti radicalaire varie entre 43 à 82%. En effet, l'échantillon séché à 40°C présente un pourcentage d'inhibition le plus important avec une valeur de $82,07 \pm 0,13$ %, suivi de 100 et 80 °C avec une valeur de 73.57 et 66.75% respectivement. Par contre, l'échantillon séché à 60 °C présente la plus faible capacité anti oxydante avec une valeur de $43,26 \pm 0,03$ %. Ceci indique que la température influence les antioxydants. La température élevée, 120 °C, n'a pas eu d'effet négatif sur l'activité antioxydante des feuilles de coriandre pendant le séchage à l'étuve. Des résultats similaires ont été rapportés par divers chercheurs tels que (**Madrau, 2009 ; Inchuen et al., 2010**).

Un extrait possédant un composé phénolique qui contient un grand nombre de groupes hydroxyle a une activité antioxydante élevée. Il a été démontré que les molécules antioxydantes telles que l'acide ascorbique et flavonoïdes réduisent et décolorent le DPPH en raison de leur capacité à céder l'hydrogène (**Kadri et al., 2011**). Comparativement au séchage conventionnel des feuilles de la mélisse officinale, des résultats de l'activité scavenger au DPPH, l'activité anti-radicalaire la plus élevée est attribuée à l'échantillon séché à 40°C.

Pour les échantillons séchés à 60°C les activités sont très faibles. La diminution de l'activité antioxydante pour les échantillons qui a subi un traitement thermique est attribuée à la dégradation thermique des composés phénoliques (**Brahmi et al., 2015**). D'autre part, il y a une augmentation du pourcentage d'inhibition observé à la température la plus élevée de 120 °C avec 67,02%, qui pourrait être due à la génération et à l'accumulation de mélanoidines dérivées de Maillard ayant un degré d'activité antioxydante variable. Propriétés antioxydantes à haute température (**Miranda et al., 2009**). Cependant, une étude antérieure a montré que la déshydratation à des températures élevées (à savoir 80 et 90°C) donne une

activité antioxydante plus élevée qu'à des températures basses de 50,70 et 60 ° C (Vega-Gálvez *et al.*, 2009).

D'après Oliveira *et al.*, (2009), l'activité anti-radical DPPH étant fortement corrélée avec le contenu en composés phénoliques totaux et en flavonoïdes, ce qui correspond à nos résultats.

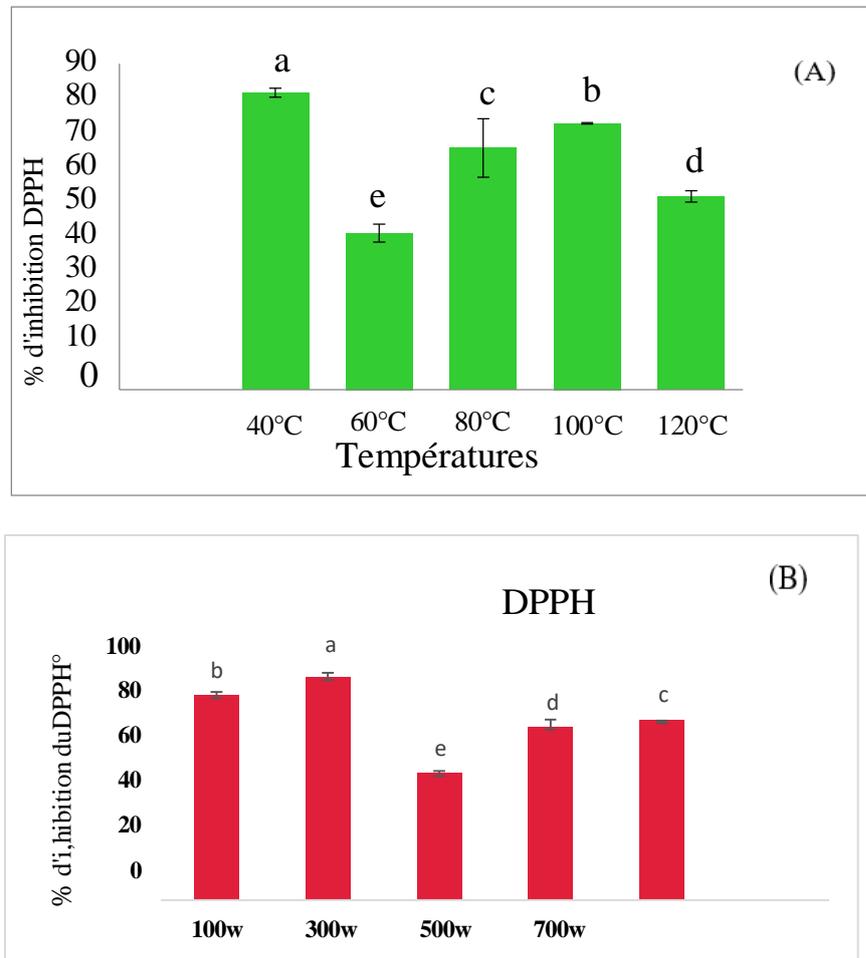


Figure 16: Effet du séchage conventionnel (A) et par micro-ondes (B) sur l'activité antioxydante DPPH des feuilles de coriandre.

Les résultats obtenus pour le pourcentage d'inhibition du radical stable DPPH des feuilles de coriandre séchées par microondes et air libre sont illustrée dans le tableau 04 et la **Figure 16(B)**.

Selon les résultats obtenus dans cette étude, les différents extraits de coriandre possèdent la capacité de réduire le radical DPPH. Les teneurs d'inhibition varient de 46.33% jusqu'à 85.11%. En effet, l'échantillon séché à 300Wet à 100W présentent les

pourcentages d'inhibition les plus importants avec des valeurs de 85.11 et 79.77% respectivement. Par contre, l'échantillon séché à 500 W présente la plus faible activité anti radical DPPH avec une valeur de 46.33%. Cette différence de l'activité anti radicalaire (DPPH) peut être expliquée par la différence des teneurs en composés phénoliques et en flavonoïdes qui ont un pouvoir d'agir comme des agents réducteurs en donnant plus d'atomes pour stabiliser les radicaux libres (**Pietta, 2000**). L'augmentation de pourcentage d'inhibition des radicaux DPPH pour les puissances 100 et 300 est peut-être due au clivage et libération des composés phénoliques à des puissances plus élevées, ce qui induit à une forte activité anti radicalaire, L'activité inhibitrice du radical DPPH ne dépend pas uniquement de la teneur en antioxydants y compris les polyphénols, mais aussi de la structure et les interactions existantes entre les différentes formes (**Turkmen et al., 2006**).

3.7.2. Le pouvoir réducteur

Le pouvoir réducteur est l'aptitude d'une substance à transférer un électron ou à donner un atome d'hydrogène. De nombreux auteurs considèrent la capacité réductrice d'un composé comme indicateur significatif de son pouvoir antioxydant (**Tepe et al., 2005**). Les résultats obtenus pour le pouvoir réducteur sont représentés dans le tableau 04 et la figure 12.

D'après la figure 16(A), Les extraits de coriandre séchées par étuve présentent un pouvoir réducteur qui varie de 14.38 à 39.05 mg /100g MS. Le pouvoir réducteur le plus intense est obtenue avec l'extrait de coriandre séchée à 40 °C (39.05±0,04 mg/100g MS), suivi de la température 100 °C (35.25±0,05 mg/100g MS). Cela peut être expliqué par la présence de composés donneurs d'électrons qui entraînent la réduction de Fe³⁺ en Fe²⁺. Une étude faite par **Brahmi et al., (2015)** sur les feuilles Le séchage de *Melissa officinalis* à différentes températures (Air libre, 40°C, 50°C, 60°C) montre que 40°C donne le meilleur résultat en pouvoir réducteur, ce qui est concordance avec nos résultats. La capacité de chélation est très importante parce qu'elle réduit la concentration des métaux des catalyseurs de transition de la peroxydation lipidique. En fait, le fer peut stimuler l'oxydation des lipides par la réaction de Fenton (**Elmastas et al., 2006**).

L'activité anti oxydante peut être estimée par la mesure du pouvoir réducteur. La réduction du (Fe³⁺) est utilisé comme un indicateur de la capacité à donner des électrons, qui est un mécanisme important de l'action des polyphénols et peut être fortement relié avec d'autres propriétés antioxydantes (**Dorman et al., 2003**).

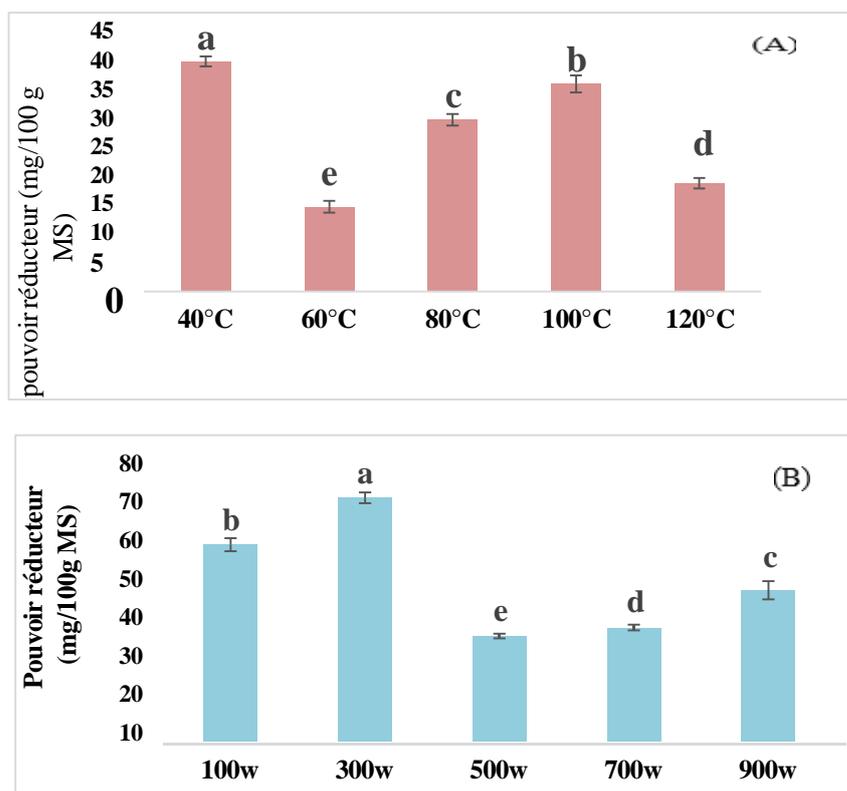


Figure 17: Effet du séchage conventionnel (A) et par micro-ondes (B) sur le pouvoir réducteur des feuilles de coriandre. Les résultats avec des lettres différentes pour la méthode de séchage conventionnelle ou par micro-ondes sont significativement différents à $p < 0,05$, avec $a > b > c > d > e$.

Les résultats obtenus pour le pouvoir réducteur sont représentés dans la **Figure 17(B)**. Selon les résultats obtenus, le pouvoir réducteur des extraits varie de 30.11 à 69.74 mg/100g MS. En effet, le pouvoir réducteur le plus important est enregistré à la puissance 300W ($69.74 \pm 0,03 \text{ mg/100g MS}$), suivi de 100W avec une valeur de $56.26 \pm 0,09^b \text{ mg/100g MS}$, alors que le plus faible est observé à 500W (30.11 mg/100g MS). Cela peut être expliqué par la présence de composés donneurs d'électrons qui entraînent la réduction de Fe^{3+} en Fe^{2+} . Néanmoins, quand on augmente la puissance de séchage, on observe une diminution de réduction du Fe^{3+} en Fe^{2+} pour atteindre une valeur de 30.11 mg/100g MS à 500W cela peut être expliqué par la destruction de quelques polyphénols sous l'effet des hautes puissances.

L'activité antioxydante dépend de la teneur en composés phénoliques et la position des groupements hydroxyles (**Jayaprakaska et al., 2008**). Généralement, les polyphénols avec un nombre élevé de groupements hydroxyles présentent l'activité antioxydante la plus élevée due à leur pouvoir de donner plus d'atomes pour stabiliser les radicaux libres (**Heim et al., 2002**).

Conclusion

Le comportement de séchage des feuilles de coriandre a été étudié pour cinq températures d'air de séchage dans une étuve (40, 60, 80, 100 et 120°C) et cinq niveaux de puissance des micro-ondes (100, 300, 500, 700 et 900 W). Les résultats de l'étude indiquent une réduction significative du temps de séchage, des taux de séchage plus élevés et des diffusivités accrues.

Les cinétiques de séchage ont montré que la méthode innovante du séchage assisté par micro-ondes permet une déshydratation plus rapide des feuilles de coriandre par rapport à la méthode conventionnelle en étuve. L'application des micro-ondes a démontré que l'énergie des micro-ondes facilite non seulement l'extraction rapide de l'eau, mais améliore également les propriétés structurelles du produit final, en préservant mieux ses caractéristiques organoleptiques et nutritionnelles.

L'impact de la température de l'étuve et de la puissance des micro-ondes sur le séchage de la coriandre est significatif. Une augmentation de la température et de la puissance entraîne une diminution du temps de séchage, avec un processus qui se déroule majoritairement en phase descendante, indiquant que le taux d'évaporation de l'eau diminue progressivement.

Plusieurs modèles mathématiques ont été utilisés pour prédire le rapport d'humidité relative (MR) des feuilles de coriandre. Parmi eux, le modèle de Midilli et al. s'est avéré le plus performant, avec un coefficient de détermination ajusté (R^2) supérieur ou égal à 0,9997, confirmant son adaptabilité et sa précision dans la modélisation du séchage.

En conclusion, le séchage assisté par micro-ondes constitue une alternative prometteuse aux méthodes conventionnelles de séchage des feuilles de coriandre. Cette technique permet non seulement un gain de temps considérable, mais elle préserve également la qualité du produit final en améliorant sa structure et ses propriétés nutritionnelles. Ainsi, l'intégration des micro-ondes dans les procédés de séchage agroalimentaires pourrait offrir des perspectives intéressantes pour l'industrie alimentaire et les producteurs de plantes aromatiques et médicinales.

Chapitre III

*Amélioration du séchage par micro-onde de
la coriandre par l'application des ultrasons*

Résumé

Ce travail a étudié une approche émergente pour améliorer le séchage par microonde (300W) de la coriandre. Les tiges de coriandres de 2 mm d'épaisseur ont été exposés aux ultrasons pendant (5 et 10 minutes et 20 min; 32KHz) à température ambiante avant d'être séchés aux micro-ondes a une puissance de 300W .Les caractéristiques de séchage et les paramètres de qualité de la plante ont été déterminés en les comparant avec ceux obtenus par des échantillons séchés aux micro-ondes sans traitement aux ultrasons. Le modèles de Midilli et al. été le modèle les plus appropriés pour le séchage US-MW avec des échantillons non traités aux ultrasons avec le plus haut R^2 et les valeurs RMSE et chi carré les plus faibles. (TPC) des tiges de coriandre ont augmenté au cours du séchage microonde combinée au ultrasons L'augmentation du niveau de micro-ondes et du temps d'utilisation des ultrasons a diminué le temps de séchage total jusqu'à 42,5 %. Cette étude a montré que l'US-MW peut être une méthode de séchage combinée utile pour la coriandre car elle réduit le temps de séchage et améliore les propriétés qualitatives du coriandre.

Mot clé : ultrasons, micro-onde, séchage, coriandre, cinétique, modèle.

Abstract

This work investigated an emerging approach to improve microwave (300W) drying of coriander. Coriander stems of 2 mm thickness were exposed to ultrasound for (5 and 10 min and 20 min; 32KHz) at room temperature before being dried by microwave at a power of 300W. The drying characteristics and quality parameters of the plant were determined by comparing them with those obtained by microwave dried samples without ultrasound treatment. The model of Midilli et al. was the most suitable model for US-MW drying with non-ultrasonic treated samples with the highest R^2 and the lowest RMSE and chi-square values. (CPT) of coriander stems increased during microwave drying combined with ultrasound. Increasing the microwave level and the time of ultrasound use decreased the total drying time by up to 42.5%. This study showed that US-MW can be a useful combined drying method for cilantro because it reduces the drying time and improves the quality properties of coriander.

Keyword : ultrasound; microwave; drying; coriander; kinetic model.

1. Introduction

A l'heure actuelle, la consommation d'aliments déshydratés a connu une augmentation sensible due sa demande sur le marché. Les méthodes conventionnelles de déshydratation basées sur le séchage à l'air chaud sont largement utilisées mais elles peuvent détériorer la qualité du produit final. Pendant le processus de séchage par micro-ondes, le volume, la masse et la teneur en humidité du produit changent constamment en fonction de la durée de traitement et des niveaux de puissance utilisée. Le séchage assisté par micro-ondes présente les avantages suivants : temps de séchage plus court, changements minimes de la qualité du produit et flexibilité dans la production d'une grande variété de produits séchés. La nécessité de prévenir la détérioration des produits a conduit les chercheurs du monde entier à rechercher de nouvelles méthodes de combinaison de technologies de séchage (**Mujamdar *et al.*, 1995 ; Jarayaman et Gupta, 1992**).

Ainsi, les aliments aux goûts indésirables, la composition de la couleur, la dégradation des vitamines et la perte d'acides aminés essentiels peuvent se produire. Les scientifiques et les centres d'innovation alimentaire sont à la recherche de nouvelles technologies de traitement des aliments pour permettre l'introduction de nouveaux aliments, plus sûrs, plus frais et de meilleure qualité, avec une durée de vie plus longue, pour les marchés locaux et d'exportation (**Mason, 1998**).

Utilisés comme prétraitement, les ultrasons améliorent significativement le processus de séchage. En générant des alternances de compression et de dépression, ils créent des micro-canaux qui favorisent l'élimination de l'humidité. Cette technique permet d'accélérer le séchage ou de réduire la température nécessaire, selon les besoins (**Mulet *et al.*, 2003 ; Bantle *et al.*, 2014**).

Les ultrasons sont une nouvelle technologie qui a été utilisée dans de nombreuses applications de traitement des aliments, telles que les produits laitiers et les boissons (**Ahmad *et al.*, 2019 ; Guimarães *et al.*, 2018, 2019a, b**), l'extraction de l'huile (**Aydar *et al.*, 2017b ; Jiménez *et al.*, 2007**) et comme une nouvelle méthode de séchage des aliments (**Huang *et al.*, 2019**). Le prétraitement par ultrasons accélère le transfert de masse dans le séchage, principalement en raison de la dégradation des cellules et de la formation de micro-canaux (**Sun, 2014**). Au cours de la dernière décennie, les ultrasons ont été appliqués en tant que prétraitement dans le séchage à l'air chaud de nombreux fruits et légumes, tels que la tomate (**Horuz *et al.*, 2014**) tels que la tomate (**Horuz *et al.*, 2017**), le kiwi (**Wang *et al.*, 2019**), le gombo (**Sunil *et al.*, 2017**), l'ail (**Bozkir *et al.*, 2018**), la pomme (**Fijalkowska *et al.*, 2016**) et

le champignon (**Zhang et al., 2016**).

Afin de minimiser la dégradation des aliments pouvant être liée à des températures élevées, la combinaison US-MW peut être effectuée à la température ambiante (**Fernandes et Rodrigues, 2007**). En effet, l'expérience acquise sur les pommes (**Simal et al., 1998**), le melon (**Fernandes, Gallão, et Rodrigues, 2008**) ou d'ananas (**Fernandes et al., 2009**) montre que cette combinaison permet d'obtenir des vitesses élevées d'élimination d'eau et le gain de solides, même à basse température, ce qui permet de mieux le maintien de l'arôme naturel, de la couleur et de la teneur en nutriments.

L'obtention d'une compréhension approfondie du processus de séchage au moyen de modèles est un outil crucial pour la conception de systèmes de séchage industriels et l'optimisation des conditions du processus (**Brassiello et al., 2013 ; Kowarski et Mierzwa, 2013**). Les modèles empiriques les plus courants sont ceux de Newton, Henderson et Pabis, Page, Modified Page, deux-term et Wang et Singh et ont été utilisés pour diverses matières alimentaires, notamment le coing (**Koç et Eren, 2008**), cerise (**Doymaz et Ismael, 2011**) raisin (**Adiletta et al., 2016**), pêche et fraise (**Johnson et Al mukhaini, 2016**) et kaki (**Senadeera et al., 2020**) pour décrire plusieurs aspects du comportement de séchage. Ces approches de modélisation permettent de prédire et de simuler les systèmes de séchage industriels et aident à choisir les conditions de fonctionnement les plus appropriées pour un séchage efficace des fruits et légumes.

Cependant, aucune étude n'a examiné l'effet combiné des ultrasons et du séchage micro-ondes sur les caractéristiques qualitatives et les paramètres de séchage des tiges de coriandre. Par conséquent, dans cette partie de l'étude, différentes durées de sonication ont été appliquées comme prétraitement au séchage micro-ondes des tiges de coriandre afin de décrire l'effet du processus aux ultrasons sur l'amélioration du séchage micro-ondes. Différents modèles empiriques ont été tentés pour prédire le processus de séchage. De plus, les attributs de qualité de la coriandre séchées ont été évalués sur l'activité de l'eau, le contenu phénolique total et l'activité antioxydante.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. Préparation de l'échantillon

L'étude a été réalisée sur les tiges de la coriandre (*Coriandrum sativum* L) achetées au niveau du marché local de Bejaia. Les échantillons ont été soigneusement lavés dans de l'eau distillée et séparées des feuilles, triées d'une façon qu'à prendre les tiges saines, essorées sur papier absorbant puis coupé en tranches identiques d'une épaisseur de 2mm.

La teneur en humidité initiale de la coriandre a été déterminée en séchant l'échantillon dans une étuve ventilée à $105 \pm 2^\circ\text{C}$ pendant 04 heures. L'humidité initiale était de $77,26 \pm 0,004$ % (w.b). Les échantillons pour le traitement ont été classés en deux catégories : témoins et traités par ultrasons (US).

2.2. Prétraitement par ultrasons

Les échantillons ont été immergés dans bain à ultrasons (la fréquence et l'intensité sont respectivement de 25 kHz et de 4650 W/m^2) et le dessus a été recouvert d'une fine grille métallique pour éviter que les échantillons ne flottent. 50g des tiges de coriandre été soumises a des ondes ultrasoniques pendant 10, 20 et 30 min (**figure 18**). Les expériences ont été réalisées à la température ambiante de l'eau (30°C) dans un bain à ultrasons sans agitation mécanique (**Fernandes et Rodrigues, 2007**). Les conditions de temps et de température du traitement par ultrasons ont été choisies en fonction de la littérature (**Bozkir et al., 2019 ; Silva et al., 2016 ; Nowacka et wedzik, 2016**). Pendant les applications d'ultrasons, l'augmentation de température était inférieure à 2°C . Les dalles de chaque traitement ont été retirées du bain à ultrasons, égouttées avec du papier absorbant, puis soumises au processus de séchage par microonde à 300W.

Les ondes ultrasonores, lorsqu'elles traversent un milieu liquide, entraînent une vibration mécanique du liquide. Si le milieu liquide contient du gaz dissous, ce qui est le cas dans des conditions normales, des microbulles peuvent se former, croître et s'effondrer violemment sous l'action de l'onde sonore. Ce phénomène est appelé "cavitation acoustique".

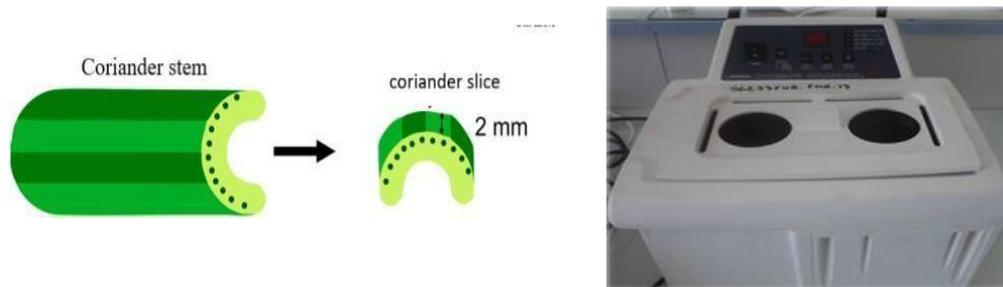


Figure 18 : Bain à ultrasons.

2.3. Séchage par microonde

Les échantillons ont été séchés dans une micro-onde numérique domestique (NN- S674MF, Kuala Lumpur, Malaisie), dont les caractéristiques techniques sont 230V, 50Hz et 2450W. Les dimensions de la cavité micro-ondes étaient de 51cm×44cm×31cm. Le four micro-ondes était composé d'une plaque de verre rotative de 300 mm de diamètre à la base du four. L'appareil était équipé d'un système de contrôle numérique du temps d'irradiation et de la puissance des micro-ondes (cette dernière étant réglable linéairement de 100 à 900 W). Le four à micro-ondes était actionné par un terminal de commande, qui pouvait contrôler le niveau de puissance des micro-ondes et le temps d'émission. La puissance 300W a été utilisée. Les échantillons ont été séchés jusqu'à ce que le taux d'humidité (pas de changement de poids) soit atteint.

I.4. Modélisation mathématique

Les cinétiques de séchage des échantillons, avec les différents traitements, ont été évaluées à l'aide des modèles mathématiques appropriés. Afin de déterminer le meilleur modèle pour décrire le comportement des cinétiques du séchage, trois modèles mathématiques empiriques (**tableau 5**) ont été évalués. Ceux-ci ont été sélectionnés en raison de leur simplicité et de leur utilisation expressive dans la littérature (**Wang et al., 2019**).

Le taux d'humidité (MR) des tiges de coriandre a été calculé à partir de l'équation suivante (**Wang et al., 2019**) :

$$\boxed{MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}} \quad (46)$$

Dans lequel ;

MR= taux d'humidité

Mt= la teneur en eau à un moment spécifique

M₀= la teneur en eau initiale

Me=la teneur en eau à l'équilibre.

Les valeurs de la Me sont relativement faibles (**Waewsak et al., 2006**) par rapport à Met M₀ pour des temps de séchage longs (**Akgun et Doymaz, 2005**). La teneur en eau à l'équilibre est supposée égale à zéro. Ainsi, la MR est simplifiée comme suit :

$$\boxed{MR = M/M_0} \quad (47)$$

Henderson et Pabis, Newton, et Midilli *et al.*, ont été appliqués pour décrire les changements de la teneur en eau et de la dégradation physicochimique des tranches de tige de la coriandre.

Les modèles de diffusion appliqués pour décrire les changements de la teneur en eau et la dégradation physico-chimique de la coriandre pendant le séchage sont présentés dans le **tableau 10** (**Aregbesola et al., 2015 ; Simal et al., 2005 ; Wang et al., 2019**).

Tableau 10 : Modèles mathématiques appliqués aux courbes de séchage de la coriandre

Modèles	Equations	Références
Henderson & Pabis	MR=a*exp(-kt)	Henderson and Phabis, 1961
Newton	MR=exp*(-kt)	Lewis, 1921
Midilli et al	MR= a*exp (-ktn)+bt	Midilli <i>et al.</i> , 2002

La qualité de l'ajustement des modèles mathématiques testés aux données expérimentales a été évaluée à l'aide du coefficient de corrélation (R²), le chi carré (X²) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Le modèle le plus approprié pour décrire les caractéristiques de séchage de la coriandre est un modèle avec le plus haut R² et les valeurs X² et le RMSE les plus faibles (**Sharma et al, 2015 ; Gunhan et al., 2005**).

Les valeurs sont calculées comme suit ;

$$X^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2}{N - z} \quad (48)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (MR_{\text{pre},i} - MR_{\text{exp},i})^2}{N}} \quad (49)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i}) \sum_{i=1}^n (MR_{\text{pre},i} - MR_{\text{exp},i})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2][\sum_{i=1}^n (MR_{\text{pre},i} - MR_{\text{exp},i})^2]}} \quad (50)$$

Où :

MR_{exp} : est le taux d'humidité expérimental ;

$MR_{\text{pré}}$: est le taux d'humidité prédit ;

N : est le nombre d'observations et z est le nombre de constantes et z est le nombre de constantes.

2.5. Evaluation des paramètres de qualités

2.5.1. Extraction et détermination des substances phénoliques

Les composés phénoliques totaux ont été extraits selon la méthode de **Dahmoune et al. (2013)**. 1 g de poudres broyées a été mélangée avec 60 ml d'un mélange de 50 % d'éthanol et de 50 % d'eau (v/v).

L'extraction a été réalisée à l'aide d'un système de four à micro-ondes domestique (400W et 123s pour la puissance des micro-ondes et le temps d'extraction, respectivement). Le mélange a ensuite été centrifugé à 6000 tours pendant 15 min et le processus a été répété deux fois. Après centrifugation, les surnagants ont été récupérés et filtrés et conservés au réfrigérateur avant analyse.

Un volume de 500 µl d'extrait dilué est ajouté à 2,5 ml du réactif Folin–Ciocalteu (10%), puis un volume de 2 ml de la solution de carbonate de sodium (7,5%) est ajouté après que le mélange ait été laissé à 27 °C dans l'obscurité pendant 2 min. La lecture de l'absorbance est effectuée à une longueur d'onde de 760 nm après 15 min incubation. La teneur en polyphénols

est calculée en se référant à une courbe d'étalonnage réalisée avec de l'acide gallique et les résultats sont exprimées en milligramme équivalent d'acide gallique par gramme de poudre (mg EAG/ g).

2.5.2. Essai du piégeage du radical ABTS

L'activité de piégeage du radical ABTS des extraits a été déterminée selon la méthode décrite par **Re et al. (1999)**, qui est basée sur la capacité des antioxydants à interagir avec le radical ABTS, et donc à diminuer son absorbance à 734 nm. En bref, une solution de radicaux ABTS (7 mM d'ABTS et 2,45 mM de persulfate de potassium) a été préparée dans de l'éthanol et laissée reposer dans l'obscurité à température ambiante (27 °C) pendant 12 à 16 heures avant d'être utilisée. Cette solution a ensuite été diluée avec de l'éthanol pour obtenir une absorbance de $0,70 \pm 0,02$ à 734 nm. Pour l'analyse de l'activité antioxydante, 2 mL de la solution de radicaux diluée ont été mélangés avec 100 μ L d'extrait et incubés dans l'obscurité pendant 6 min et l'absorbance a été lue à 734 nm. L'activité antioxydante des échantillons testés a été calculée en déterminant la diminution de l'absorbance à différentes concentrations en utilisant l'équation suivante :

$$E = ((Ac - At) / Ac) \times 100 \quad (51)$$

Où At et Ac sont respectivement l'absorbance des échantillons testés et de l'ABTS+, exprimée en μ mol.

2.6. Analyse statistique

Toutes les données obtenues représentent la moyenne de 3 essais, et les données expérimentales ont été exprimées sous forme de moyennes \pm écart-type. Les comparaisons statistiques ont été effectuées à l'aide de l'analyse de la variance (ANOVA) à un niveau de confiance de 95 % ($P < 0,05$) en utilisant le JMP pro 10.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Cinétiques du séchage

Le séchage dans la technologie alimentaire est généralement basé sur l'utilisation de méthodes conventionnelles telles que l'échange de chaleur par conduction ou convection, qui peuvent avoir des effets négatifs sur les questions de texture des produits finaux. Afin d'obtenir des produits finis de haute qualité, de nouvelles techniques sophistiquées de traitement des aliments sont nécessaires. L'une de ces méthodes est le séchage assisté par ultrasons. Cette méthode s'est avérée efficace pour préserver les principales caractéristiques et la qualité des produits, et permet en outre de réduire le temps de séchage. Pour analyser l'influence de l'applications d'ultrasons (US) sur le séchage, des courbes de séchage ont été étudiées à une puissance de 300W ; sans ultrasons et en utilisant des ultrasons pendant 10, 20 et 30 min.

La cinétique de séchage des tranches de coriandre a été influencée par les prétraitements effectués. Dans toutes les conditions testées, le séchage des tiges de coriandre s'est déroulé dans la période descendante ; l'effet du prétraitement par ultrasons sur la perte de poids est représenté dans la **figure 19**. L'utilisation des ultrasons comme prétraitement a entraîné une perte de poids des tiges de coriandre. Après 30 minutes de traitement aux ultrasons, la perte de poids était la plus faible ($07,01 \pm 0,003\%$) avec un temps de séchage le plus court (55sec). Le prétraitement avec des ultrasons pendant 10, 20 et 30 minutes a eu un effet positif sur la perte d'eau du tissu de la coriandre par rapport au traitement par microonde seul.

Les résultats expérimentaux ont montré que les échantillons séchés sans prétraitement a l'ultrason ont eu besoin d'environ 2 min et 5 sec pour perdre 100 % de leur poids initial, dans le cas de l'expérience de séchage assisté par ultrasons (300W + US10 min), le temps de séchage était de 85sec et de 70 sec pour (US+20 min) et, le temps le plus cour est obtenue avec 30min d'ultrasons (US+30 min) qui est de 55sec.

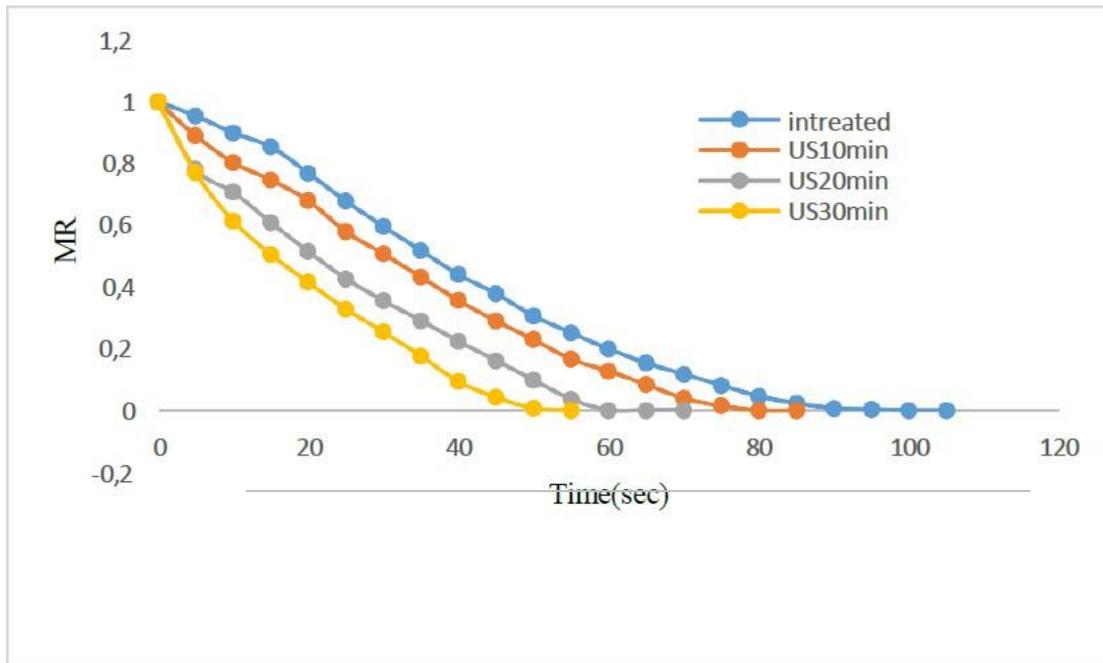


Figure 19: Taux d'humidité des tiges de coriandre en fonction du temps de séchage pour différents traitements (avec et sans ultrasons).

L'augmentation du temps de séchage, en utilisant les ultrasons comme prétraitement, pourrait être dû à la création de canaux microscopiques pendant le prétraitement par ultrasons, qui peut faciliter l'élimination de l'humidité et augmente la diffusivité de l'eau (**Fernandes et Rodrigues, 2007 ; Fernandes, Gallão et al. Rodrigues, 2007 ; Fernandes, Gallego et al., 2007, Fernandes, Linhares et al., 2008**).

Lorsque les ultrasons sont appliqués dans un système solide-fluide, ils produisent une série d'effets qui peuvent affecter la résistance interne et externe au transfert de masse entre le solide et le fluide. Dans les systèmes liquides, les principaux effets mécaniques des ultrasons sont fournis par la cavitation. La cavitation consiste en l'apparition, la croissance et l'effondrement de bulles à l'intérieur du liquide qui, par exemple, dans l'eau, génère une température d'environ 40 000 K et une pression supérieure à 1 000 atm en de nombreux points localisés appelés "points chauds" (**Mason et al., 2005**). Cet effondrement de bulles, distribué à travers le thérium, a des effets variés. Ainsi, l'effondrement des bulles est asymétrique près des interfaces et produit un microjet qui frappe la surface solide (**Mason, 1998**). C'est le principal effet observé lors de l'utilisation des ultrasons à haute intensité dans les opérations de nettoyage. Les microjets qui frappent la surface des aliments solides peuvent produire une injection de fluide à l'intérieur du solide (**Mason et Lorimer, 2002**) et affecter le transfert de

masse entre le solide et le fluide. Si la cavitation est produite dans la phase liquide interne des aliments, elle peut faciliter le transport de l'humidité du solide vers le milieu environnant. Selon les caractéristiques du système, les bulles ne s'effondrent parfois pas et continuent à vibrer à la même fréquence que les ultrasons appliqués (**Leighton, 1998**). Cette vibration contribue également à l'agitation du liquide. Les ultrasons de haute intensité peuvent générer un vent sonore dans le fluide produit par les ondes ultrasonores planes. Ce type d'agitation peut réduire la résistance externe au transfert de masse en augmentant le transport en vrac au sein du fluide (**Mulet et al., 2003**). L'interaction des ultrasons dans les interfaces solide-fluide peut produire une micro-agitation (**Pugin and Turner, 1990**). Cette microagitation est très importante car elle se forme à proximité immédiate de la surface solide (**Borisov et Gynkina, 1973**) et exerce une influence importante sur la réduction de l'épaisseur de la couche limite de diffusion. Tous ces effets influencent la résistance externe et devraient affecter le transfert de masse de la même manière que l'agitation mécanique. Dans le solide, les ondes ultrasoniques produisent une série de compressions et d'expansions rapides du matériau qui peuvent être comparées à une éponge pressée et relâchée à plusieurs reprises (**Floros et Liang, 1994**). Cet effet, connu sous le nom d'éponge aide le liquide à s'écouler hors des échantillons (**Gallego-Juárez et al., 1999**).

La porosité peut être considérée comme l'une des variables structurelles les plus importantes pour déterminer l'efficacité acoustique sur les aliments. On peut considérer que les produits à forte porosité sont plus enclins aux cycles alternés de compression et d'expansion des produits par les ondes ultrasonores (effet éponge). (**Gallego-Juárez, 1998**), améliorant ainsi le taux de transfert d'eau dans ses grands espaces intercellulaires. On trouve également de petits espaces intercellulaires dans les produits à faible porosité, ce qui signifie une résistance interne élevée au transfert d'eau ce qui signifie une résistance interne élevée au transfert d'eau. Ainsi, des niveaux d'énergie acoustique élevés sont nécessaires pour affecter le transfert de masse dans les produits à faible porosité (carotte) (**García-Pérez et al., 2007**).

Le phénomène d'ultrasons, peut-être dû au processus de formation de microcanaux pendant l'application d'ultrasons et l'eau pourrait utiliser les canaux microscopiques comme une voie plus facile pour diffuser vers la surface du fruit, contribuant ainsi à une plus grande diffusivité de l'eau, comme l'observé **Fernandes et al. (2008a)**. Ces auteurs ont vérifié sur des images microscopiques que les microcanaux étaient formés par l'allongement et l'aplatissement des cellules dans certaines régions des melons soumis aux ultrasons, et qu'aucune rupture cellulaire n'était observée dans les échantillons.

Cependant, l'effet de la durée du traitement par ultrasons sur les tissus végétaux n'est pas explicite. Dans notre étude, les échantillons traités par ultrasons pendant 30 et 20 minutes ont été séchés plus rapidement que les échantillons traités pendant 10 minutes. De plus, le matériau sans prétraitement a présenté le temps de séchage le plus long. L'influence du temps de sonication a été différente pour divers types de matières premières : par exemple, le séchage des ananas (Fernandes *et al.* 2008b) et des bananes (Rodrigues et Fernandes, 2008) était plus rapide après 20 min d'application d'ultrasons qu'après 10 et 30 min. Cependant, les fruits de sapota soumis à un prétraitement aux ultrasons pendant 30 min ont séché plus rapidement par rapport à l'échantillon prétraité pendant 10 min (Fernandes et Rodrigues, 2008).

L'utilisation des ultrasons dans le traitement est une méthodologie intéressante qui est complémentaire au séchage aux micro-onde. L'utilisation du prétraitement par ultrasons a augmenté la diffusivité de l'eau du fruit, ce qui a permis un séchage au microonde plus rapide.

3.2. Modélisation mathématique du séchage US-MO

Le tableau 11 montre les coefficients de régression (R^2) et les paramètres statistiques des courbes de vitesse de séchage pour les échantillons étudiés. Le modèle de Midilli s'est avéré très bien adaptés aux données expérimentales avec une valeur de R^2 égale à 0,999, des valeurs RMSE très petit.

Tableau 11 : Paramètres du modèle de Midilli et al. décrivant la cinétique du taux de séchage des tiges de coriandre

Traitement	Equation $y = \exp(-k^m) + bt$				Statistical parameters		
	A	K	N	b	R^2	RMSE	X^2
Non traité(300W)	0,995	0,005	0,855	0,3958	0,999	$5,6 \cdot 10^{-3}$	0,0004
US10min	1,011	0,256	0,822	-0,0003	0,999	$5,8 \cdot 10^{-3}$	0,0002
US20min	1,012	0,356	0,800	-0,0005	0,999	$4,4 \cdot 10^{-3}$	0,0001
US30min	1,014	0,543	0,750	-0,0012	0,999	$4,8 \cdot 10^{-3}$	0,0001

Les valeurs calculées des coefficients effectifs de diffusion de l'eau pour chaque échantillon individuel sont présentées dans le **tableau 12**. Ce paramètre peut être utilisé comme un indicateur spécifique de la vitesse de séchage. Par conséquent, la valeur la plus élevée du coefficient de diffusion effective de l'humidité a été l'échantillon traité par ultrasons pendant 20 minutes. Il est évident que les coefficients de diffusion de l'humidité effective correspondent au temps de séchage donc tous les prétraitements par ultrasons améliorent la diffusion de l'eau ce qui diminue le temps de séchage. Il convient de noter que d'autres méthodes de prétraitement non thermiques conduisent également à une augmentation de ce paramètre, par ex, le traitement par champ électrique pulsé (PEF) (**Ade- Omowaye et al., 2003**).

Tableau 12: Le coefficient de diffusion effectif de l'humidité pendant le séchage des tiges de coriandre en fonction des paramètres de sonication.

Traitement	D x 10 ⁻¹⁰ (m ² /sec)	R ²
Non traité	0,14	0,997
10 min US	0,43	0,999
20min US	0,87	0,999
30min US	0,65	0,999

3.3. Effet des traitements de séchage sur les substances antioxydantes

3.3.1 Composés phénoliques

Un certain nombre d'études ont montré que la présence de composés phénoliques dans les aliments et notamment dans les fruits peut être particulièrement importante pour les consommateurs, en raison de leurs propriétés bénéfiques pour la santé (**Pulido et al., 2000**). Outre les effets antioxydants, les composés phénoliques possèdent un large spectre de propriétés biochimiques et peuvent également avoir un effet bénéfique dans la prévention du développement de maladies telles que le cancer et les maladies cardiovasculaires (**Lattanzio, 2003**).

L'influence du prétraitement par ultrasons sur les tiges de coriandre et son effet sur le contenu total en polyphénols ont été représentés dans la **figure 20** et le tableau A partir de cette figure, nous pouvons voir clairement que l'extrait de poudre obtenu par un prétraitement pendant 20 min a enregistré, statistiquement ($p < 0,05$) la plus grande quantité de polyphénol

total (86,46 mg GAE/g) suivi par l'échantillon prétraité pendant 30 min (76,19 mg GAE/g). En outre, aucune différence significative n'a été constatée entre les échantillons non traités (66,99 mg GAE/g) et ceux prétraités pendant 10 min (69,77 mg GAE/g).

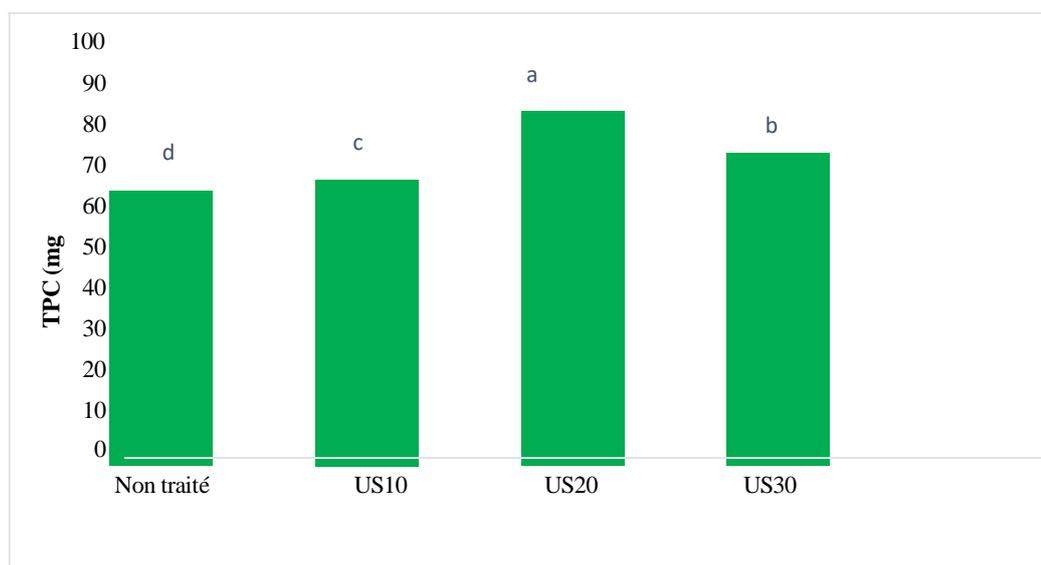


Figure 20: Teneur en polyphénol totaux des tiges de coriandre séchées au microonde en combinaison avec des ultrasons.

3.3.2. Activité de piégeage du radical ABTS

L'évaluation de l'activité antioxydante des feuilles de coriandre a été effectuée à l'aide du test des radicaux ABTS. Ce test repose sur un mécanisme de transfert d'électrons et mesure la capacité des échantillons à réduire le cation radical $ABTS^{\cdot+}$ de couleur vert-bleu, en une forme incolore. Ainsi, un taux d'inhibition plus élevé indique une meilleure activité antioxydante.

Dans le cadre de cette étude, les tiges de coriandre ont été séchées par une combinaison de micro-ondes et d'ultrasons, puis soumises à une analyse de leur pouvoir antioxydant. Les résultats obtenus, exprimés en pourcentage d'inhibition du radical $ABTS^{\cdot+}$, sont illustrés dans **la figure 21**.

L'analyse des données révèle que l'activité antioxydante la plus élevée a été observée pour les échantillons ayant subi un traitement de 20 minutes, avec un pourcentage d'inhibition de $68,64 \pm 0,03$ %. Ce résultat est significativement supérieur à celui des échantillons traités pendant 30 minutes ($54,98 \pm 0,02$ %) et à celui des échantillons non traités, qui présentent un taux d'inhibition de $40,12 \pm 0,05$ %.

Il convient également de noter que les échantillons ayant subi un traitement de 10 minutes ont affiché un pourcentage d'inhibition plus faible ($32,45 \pm 0,03$ %), indiquant que cette durée de

traitement n'était pas optimale pour améliorer l'activité antioxydante. L'analyse statistique a démontré des différences significatives entre les groupes ($p < 0,05$), confirmant l'effet du traitement sur la capacité de neutralisation des radicaux libres.

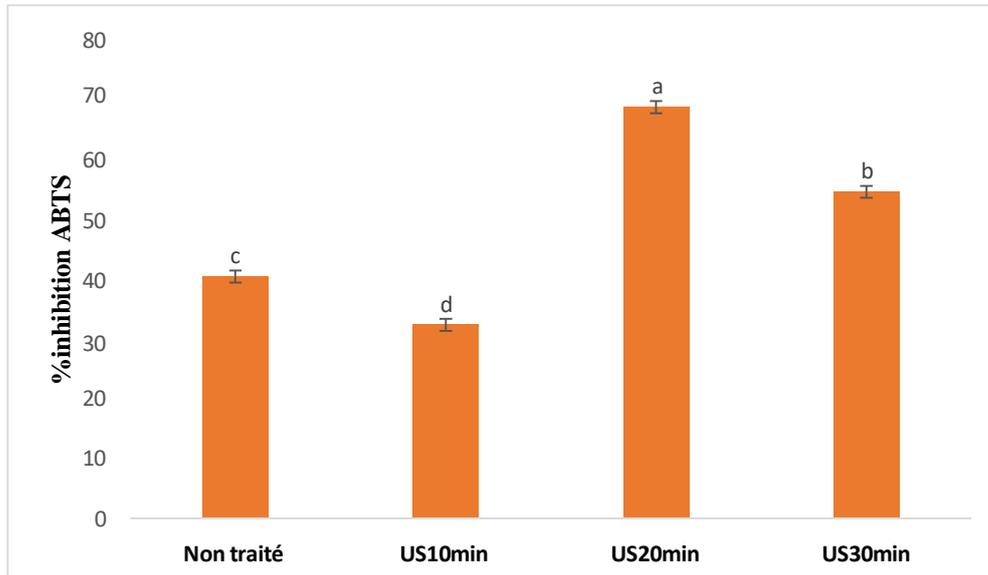


Figure 21 : Inhibition radicalaire ABTS des tiges de coriandre séchées au microonde en combinaison avec des ultrasons.

De plus, l'application d'ultrasons en tant que prétraitement avant le séchage conventionnel s'est révélé particulièrement bénéfique, entraînant une augmentation de 28,52 % de l'activité antioxydante. Cela suggère que l'utilisation combinée des ultrasons et des micro-ondes optimise la préservation des composés bioactifs responsables de l'activité antioxydante des tiges de coriandre.

Conclusion

L'utilisation d'ultrasons comme prétraitements dans le séchage par micro-onde semble être une technologie prometteuse pour améliorer la qualité et les économies d'énergie. Comme cette technologie semble être plus efficace à basse température, les effets sur la qualité liée aux températures élevées peuvent être évités sans compromettre la cinétique du processus.

L'application d'ultrasons a réduit le temps de séchage et a amélioré la diffusion de l'humidité et le coefficient de transfert de masse du séchage des tiges de coriandre. Le modèle Midilli *et al* a décrit de manière adéquate la cinétique de la perte d'eau de différentes méthodes de prétraitement pendant le processus de séchage.

Les coefficients de diffusion efficaces des prétraitements aux ultrasons de 20 minutes étaient plus élevés que ceux des prétraitements aux ultrasons de 10 et 30 minutes et les échantillons non traités aux ultrasons. Le modèles de Midilli *et al* a bien expliqué les caractéristiques de séchage des échantillons séchés aux micro-ondes combinée aux ultrasons ($R^2 > 0.999$).

Les vibrations ultrasonores peuvent être appliquées au matériau à déshydrater par contact direct ou par autre voie. Le site peut également être utilisé de manière continue ou intermittent et en combinaison avec différentes technologies de séchage telles que le séchage par convection, le séchage sur lit fluidisé, le séchage à basse température et le séchage par microonde.

La qualité globale des produits séchés par ultrasons est généralement supérieure à celle des produits séchés de manière conventionnelle, alors que l'effet du séchage par ultrasons sur la texture et la valeur nutritionnelle des produits et la combinaison du séchage par ultrasons avec d'autres technologies de séchage novatrices et l'étude des effets des ultrasons sur la texture et la valeur nutritionnelle des produits devraient faire l'objet de recherches plus approfondies. Limites opérationnelles pour générer l'échelle nécessaire de US aéroportés, et le coût relativement élevé et la consommation d'énergie de ces équipements à l'échelle industrielle peuvent entraver leur application dans l'industrie du séchage des aliments.

Par conséquent, l'optimisation du séchage assisté par ultrasons en termes de consommation d'énergie et de conception du processus est un autre domaine qui mérite des recherches plus approfondies.

Chapitre IV

Activités antioxydantes, anti-microbiennes et Anti- inflammatoires des huiles essentielles des graines de coriandre

Résumé

Les plantes aromatiques sont des sources inépuisables de substances naturelles douées de propriété biologique présentant un intérêt réel. Les huiles essentielles (HE) possèdent des propriétés antimicrobiennes, anti-inflammatoires, insectifuges, anticancéreuses et antioxydantes, entre autres. Dans la présente partie du travail, l'activité antioxydante, antimicrobienne et anti-inflammatoire des huiles essentielles des graines de coriandre ont été évalués. Pour l'activité biologique, *Coriandrum sativum* a montré une activité sur tous les germes testés mis à part *Pseudomonas aeruginosa*, souvent résistant. En outre, l'activité anti-inflammatoire in vitro est étudiée par la méthode de l'inhibition de la dénaturation de l'albumine l'huile essentielle de *Coriandrum sativum* donné un pourcentage d'inhibition très important (80%) par rapport au Diclofénac (63%) confirmant ainsi sa propriété anti-inflammatoire. Ce qui supporte son usage dans le traitement des inflammations et comme nouvelle molécule anti-inflammatoire.

Mots clés : *Coriandrum sativum*, huile essentielle, activité antioxydante, , activité anti-inflammatoire, activité antimicrobienne.

Abstract

Aromatic plants are inexhaustible sources of natural substances endowed with biological properties of real interest. Essential oils (HE) have antimicrobial, anti-inflammatory, insect repellent, anticancer and antioxidant properties, among others. In the present part of the work, the antioxidant, antimicrobial and anti-inflammatory activity of the essential oils of coriander seeds were evaluated. For biological activity, *Coriandrum sativum* showed activity on all the germs tested except *Pseudomonas aeruginosa*, often resistant. In addition, the anti-inflammatory activity in vitro is studied by the method of inhibition of the denaturation of albumin the essential oil of *Coriandrum sativum* gave a very high percentage of inhibition (80%) compared to Diclofenac (63%) thus confirming its anti-inflammatory property. The following are used in the treatment of inflammations and as a new anti-inflammatory molecule

Key words: *Coriandrum sativum*, essential oil, antioxidant activity, , anti-inflammatory activity, antimicrobial activity.

1. Introduction

Tout au long de l'histoire, les progrès de la science ont démontré les nombreux avantages des plantes médicinales et de leurs huiles essentielles pour favoriser la guérison, la relaxation, la beauté et le parfum avec une toxicité minimale. Cette pratique, connue sous le nom d' "aromathérapie", consiste à utiliser des huiles essentielles pour traiter une variété de symptômes de maladies (**Yahyaoui, 2005**).

L'Organisation mondiale de la Santé (**OMS, 2008**) souligne que plus de 80% de la population mondiale se tourne vers la médecine traditionnelle pour les besoins de soins de santé primaires en raison de la pauvreté et de l'accès limité aux services médicaux modernes. Cela souligne l'importance de remédier aux disparités en matière de soins de santé et d'améliorer l'accès à la médecine moderne pour les populations mal desservies (**Pierangeli et al., 2009**).

L'Algérie possède une richesse importante de plantes aromatiques et médicinales qui ont le potentiel d'applications dans diverses industries, notamment la pharmacie, la parfumerie, la cosmétique et l'agroalimentaire, en raison de leurs propriétés thérapeutiques, organoleptiques et odorantes. Ces plantes aromatiques servent de base à des produits à forte valeur ajoutée, tels que des huiles essentielles et des extraits, se manifestant souvent par des mélanges complexes (**Cherif, 2020**).

La coriandre (*Coriandrum sativum L.*) est une épice essentielle et économiquement importante dans la famille des Apiacées (Ombellifères). Il s'agit d'une plante herbacée annuelle. Les feuilles sont de couleur vert clair ou vert foncé, segmentées et habituellement en 3 lobes. Les fleurs blanches ou roses pâles sont en forme de parapluies aux extrémités des branches et apparaissent en juin-juillet. Les fruits sont jaune-brun clair, sphériques schizocarpes d'un diamètre de 2-4 mm. Le poids des fruits varie entre 5 et 18 (**Diederichsen et Hammer, 2003; Yeung and Bowra, 2011**).

La coriandre a de l'huile essentielle qui expose large activité biologique (antifongique, antibactérien, antioxydant, antibactérien, antidiabétique, antidépresseur etc.)((**Gkogkas et al., 2013 ; Al-Khayri et al., 2023**). Des études ont montré que l'huile essentielle de coriandre a déterminé l'efficacité inhibitrice contre *Bacillus subtilis*,

Candida albicans, *Enterococcus faecalis*, *Entérocoque faecium*, *Klebsiella pneumoniae*, *Listeria inoffensive*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Salmonelle enteritidis*, *Salmonella infantis*, et *Salmonelle du Kentucky* (Serban et al., 2011).

L'objectif de cette la dernière partie de cette thèse est d'évaluer les paramètres physico-chimiques des essences de *Coriandrum sativum*, l'évaluation du profil antioxydant, l'activité antimicrobienne sur certaines souches bactériennes et fongiques et anti-inflammatoire .Ce choix s'est basé sur la disponibilité du coriandre en Algérie et sur le fait que relativement peu de travaux ont été faits dans ce sens sur son huile essentielle.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. Matériel végétale

Les échantillons de graines de *Coriandrum Sativum* utilisées proviennent de la Wilaya de Bejaia chez un épicier qui se fournit auprès de producteurs locaux. Ensuite, le matériel végétal a été purifié puis broyer en fine poudre à l'aide d'un broyeur électrique et stockée à l'abri de la lumière dans une boîte sombre jusqu'à son utilisation.

2.2. Extraction des huiles essentielles

L'extraction de l'huile essentielle a été effectuée par hydrodistillation dans un appareil de type Clevenger (Clevenger, M 497940/01) où l'on place 50 g de matière végétal dans 500ml d'eau distillée. L'ensemble est porté à ébullition pendant 3h à l'aide d'un chauffe ballon ; Les vapeurs chargées d'huile essentielle traversent le réfrigérant et se condensent ainsi avant de chuter dans la petite ampoule à décanter.

Afin de séparer l'huile de l'eau, on ajoute 2g de chlorure de sodium (NaCl), on agite bien afin de dissoudre le sel, puis on rajoute 10ml de l'éther diéthylique. L'huile essentielle obtenue est stockée au réfrigérateur dans un flacon en verre brun fermé hermétiquement à 4°C.

2.3. Caractérisation physico-chimique

Dans le passé, les caractéristiques sensorielles telles que l'apparence, la couleur et l'odeur étaient les principaux facteurs utilisés pour évaluer la qualité des huiles essentielles. Cependant, comme ces propriétés n'offrent que des informations limitées, il est essentiel d'utiliser des techniques de caractérisation plus avancées. La qualité et la valeur des huiles essentielles sont déterminées par des normes établies qui se concentrent sur les indices physico-chimiques.

2.3.1. Détermination du pH

Le pH est l'abréviation du potentiel d'hydrogène qui mesure l'activité chimique des ions hydrogènes (H^+) (appelés aussi couramment protons) en solution. Plus couramment, le pH mesure l'acidité ou la basicité d'une solution. Il s'agit d'un coefficient permettant de savoir si une solution est acide, basique ou neutre : elle est acide si son pH est inférieur à 7, neutre s'il est égal à 7 et basique s'il est supérieur à 7 (**Hamadou et Touki ,2017**) Quelques gouttes d'huile essentielle sur un bout de papier pH. Laisser le papier quelques minutes pour sécher. Après le changement de la couleur du papier on la compare avec une gamme de couleurs qui varient

selon le pH.

2.3.2. Indice de réfraction

L'indice de réfraction d'une huile essentielle est le rapport entre le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction d'un rayon lumineux de longueur d'onde déterminée, passant de l'air dans l'huile essentielle maintenue à une température constante (589 nm) (**Dridi, 2005**). L'indice de réfraction de l'huile est mesuré avec un réfractomètre CONVEX.

2.3.3. Densité

La mesure de la densité se fait avec un densitomètre à affichage numérique APPAR DMA 45.

2.3.4. La viscosité

La mesure de la viscosité des HE a été faite à l'aide d'un viscosimètre de Brookfield Model DV-I+ à affichage numérique.

2.4. Evaluation de l'activité antioxydante des huiles essentielles

L'activité antioxydante des huiles essentielles (OE) est un domaine de recherche important, soulignant leur potentiel dans diverses applications, y compris la conservation des aliments et les utilisations thérapeutiques. Les OE présentent divers mécanismes d'action, principalement grâce à leurs composés actifs, qui peuvent piéger les radicaux libres et réduire le stress oxydatif.

L'activité de piégeage des radicaux des huiles essentielles était évalué à l'aide de diphenylpicrylhydrazyle (DPPH•). Selon la méthode de **Burits et Bucar, (2000)**.

Une série de dilutions (50, 40, 30, 20, 10 µg / ml) est préparé à partir d'une solution mère. Par la suite, 500 µL de chaque concentration d'extrait sont ajoutés à 1,5 ml d'une solution méthanolique de DPPH dans un tube d'hémolyse. Les mélanges sont soigneusement agités puis laissés à incuber dans l'obscurité à température ambiante pendant 30 minutes. Ensuite, l'absorbance est mesurée à 517 nm à l'aide d'un spectrophotomètre.

L'acide gallique a été utilisé comme antioxydant synthétique de référence (contrôle positif) à différentes concentrations dont la lecture se fait dans les mêmes conditions que l'échantillon testé.

La capacité de l'antioxydant (huiles essentielles ou acide gallique) à piéger le radical libre est estimée en déterminant le pourcentage de décoloration (réduction) du DPPH en solution dans le méthanol,

Le pourcentage d'inhibition (I%) du radical libre DPPH est calculé selon la formule suivante.

$$I \% = \frac{A_0 - A}{A_0} \times 100 \quad (52)$$

I % : Le pourcentage d'inhibition

A₀ : Absorbance de la réaction de contrôle contenant tous les réactifs sauf l'huile (T=0min)

A: Absorbance de l'échantillon contenant une dose d'huile testée (T=30min)

➤ **Estimation d'IC₅₀** : L'IC₅₀ est défini comme étant la concentration de l'échantillon testé nécessaire pour réduire 50% de radical DPPH•, aussi appelé EC₅₀ (concentration équivalente à 50% de DPPH réduit). Les IC₅₀ sont déterminées graphiquement par régressions linéaires des graphes tracés (taux d'inhibition en fonction de différentes concentrations des fractions testées). Tous les essais ont été effectués en triple.

2.5. Evaluation de l'activité anti inflammatoire, *In Vitro*

La dénaturation des protéines est un processus par lequel les protéines perdent leurs structures tertiaires et secondaires à la suite d'une exposition à un stress ou à des composés externes, tels que des acides ou des bases forts, des sels minéraux concentrés, des solvants organiques ou de la chaleur. La majorité des protéines biologiques perdent leurs propriétés fonctionnelles lorsqu'elles sont dénaturées. Le principe sous-jacent de cette technique est enraciné dans la capacité de ces extraits à atténuer la dénaturation thermique de la BSA.

La dénaturation des protéines a été largement documentée comme cause d'inflammation et est impliquée dans diverses affections inflammatoires. Par conséquent, la capacité d'une substance à inhiber la dénaturation des protéines suggère un potentiel d'activité anti-inflammatoire (**Oualiet Sadouni, 2017**).

L'effet inhibiteur in vitro de l'huile essentielle des graines de coriandre a été déterminé en utilisant la méthode décrite par **Habibur et al. (2015)** avec modifications. 50 µl d'huiles essentielles ont été mélangé à des concentrations de 50, 100, 250 et 500 mg /

ml avec 450 µl de BSA à 0,5%.Après une incubation de 20 minutes à 37°C, les tubes ont été placés dans un bain marie à 57°C pendant 30 minutes. Par la suite, 2,5 ml de tampon phosphate (pH=6,3) ont été ajoutés. Après refroidissement des tubes, la turbidité a été mesurée à 660 nm à l'aide d'un spectrophotomètre à cuvette. Le diclofénac sodique a été utilisé comme étalon dans les mêmes conditions que les extraits.

Le pourcentage d'inhibition est calculé par la formule:

$$\text{Pourcentage d'inhibition} = [100 - (\text{DO de la solution d'essai} - \text{DO de contrôles des produits} / \text{DO de test contrôle})] \times 100$$

(53)

2.6. Evaluation de l'Activité antimicrobienne

La sélection des bactéries s'est concentrée sur quatre souches bactériennes et deux souches fongiques courantes prévalentes en pathologie humaine. Ces espèces contribuent fréquemment à des maladies d'origine alimentaire, posant un problème de santé publique important en raison de leur résistance inhérente à divers agents antimicrobiens.

Les microorganismes utilisés pour tester la l'activité antimicrobienne de l'huile essentielle était de souches de référence : Gram- (*Escherichia coli* ATCC 25992 ; *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 9027 ; *Micrococcus luteus* ATCC 4698) et bactéries à Gram positif (*Staphylococcus aureus* ATCC 25923).

Pour les espèces fongiques, on a utilisé : *Fusarium oxysporum* et *Fusarium solani*.

Ces souches nous ont été fournies par le laboratoire de microbiologie et de phytopathologie de l'Université Mohamed El Bachir El Ibrahim (BBA). Ils ont été maintenus par repiquage sur milieu gélosé nutritif propice à leur croissance à l'obscurité pendant 24 heures à 37°C.

L'activité antimicrobienne de l'huile essentielle de graines de coriandre est évaluée à l'aide de la méthode de diffusion sur disque décrite par **Mayachiew et Devahastin (2008)**. Cette méthode est choisie pour sa simplicité et son efficacité à tester la sensibilité des bactéries en question.

2.6.1. Activité antibactérienne

La méthode d'aromatogramme a été choisie comme technique de choix pour déterminer l'activité antibactérienne de l'huile essentielle examinée. Cette méthode est basée sur

la capacité migratoire des huiles essentielles dans un milieu solide contenu dans une boîte de Pétri. Il permet d'identifier l'impact antimicrobien de l'huile essentielle sur les microorganismes testés, ainsi que d'évaluer la résistance ou la sensibilité de ces bactéries à l'huile essentielle en question.

Vingt millilitres (20ml) de l'agar de Muller Hinton en surfusion sont coulés dans des boîtes de Pétri. Après solidification du milieu de culture, la suspension bactérienne à tester est ensemencée par écouvillonnage.

Des disques de papier imprégnés d'huile de coriandre ont été placés dans des boîtes de pétrie (4disques/boite), précédemment inoculés avec le microorganisme choisi, les boites sont maintenues à 4°C pendant 1h pour que l'huile essentielle puisse diffuse puis les imbibés sur un milieu de culture gélosé incubé à 37°C pendant 24 heures, pour permettre la diffusion de l'échantillon dans la gélose. Suite à cette procédure, des zones d'inhibition de la croissance ont été mesurés (**Ouis, 2015**).

L'échelle d'estimation de l'activité antimicrobienne est donnée par **Moreira et al ., 2005**. Ils ont classé le diamètre des zones d'inhibition (D) de la croissance microbienne comme suit :

Non sensible (-) : $D \leq 8$ mm Sensible (+) : $9 \leq D \leq 14$ mm

Très sensible (+ +) : $15 \leq D \leq 19$ mm Extrêmement sensible (+++) : $D \geq 20$ mm

L'intensité de l'effet antimicrobien a été testée en comparaison avec des substances antibactériennes de référence, utilisées comme microcapsules pour antibiogrammes: Amoxyclave (AMC30) ; Nitroxoline (NO30) ; Gentamicine (GEN10) ; Nitroxoline (NO30) Erythromycine (E2) ; Chloramphénicol (C30) ; Pristinomycin (RP15).

En pratique, on réalise à partir d'une souche pure un ensemencement en tapis sur le milieu. Ensuite, les disques d'antibiotique sont disposés, puis incubés à 37°C pendant 24h. La lecture se fait après 24h, en mesurant avec précision les diamètres des zones d'inhibition. (**Ouis , 2015**)

2.6.2. Evaluation de l'activité antifongique

Les souches fongiques sont placées dans des boîtes de Pétri contenant du milieu PDA solide et incubées jusqu'à ce que la croissance mycélienne s'étende jusqu'aux bords des boîtes. Les disques fongiques sont ensuite transférés dans des tubes de culture contenant de l'eau physiologique stérile pour produire des suspensions de spores.. (Bouguerra, 2012).

L'activité antifongique des huiles essentielles contre *Fusarium* a été étudiée dans des conditions de laboratoire en utilisant le contact et méthodes de fumigation dans les PDA. Dans la méthode de contact, différentes concentrations d'huiles essentielles (31,25, 62,5 ;125 ; 250, 500) ont été dissous dans du milieu PDA contenant du DMSO (Tableau 13).

Tableau 13 : Les différentes concentrations de l'huile essentielle utilisée (mg/ml).

Concentration (mg/l)	500	250	125	62.5	31.25
Volume de l'HE (l)	500	250	125	62.5	31,25
Volume de DMSO (l)	0	250	375	437.5	468,5

Dans des conditions aseptiques et à l'aide d'une pince stérile, des disques de papier filtre (3disques/boite) sont déposés sur l'agar, précédemment inoculé avec le microorganisme choisi , puis les imbibés par 5µL d'huile essentielle des graines du coriandre Le DMSO a été utilisé comme contrôle négatif. Les boites sont maintenues à 4°C pendant 1h pour que l'huile essentielle puisse diffuser. Les boites ont été incubées à l'étuve à 28°C de 02 à 07 jours. (Ouis, 2015)

A la sortie de l'incubateur, l'absence de la croissance microbienne se traduit par un halo translucide ou tour du disque, identique à la gélose stérile, dont le diamètre est mesuré à l'aide d'une règle.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Caractéristiques physicochimiques

Les caractéristiques physiques (rendement, pH, indice de réfraction et densité relative) sont regroupées dans le tableau 14.

Tableau 14 Caractéristiques physico-chimiques des huiles essentielles de la coriandre.

Rendement	pH	Indice de réfraction	Densité relative
0,1428	6	1,3682	0 ,9

3.1.1. Rendement

Il est important de noter que, bien que toutes les plantes aient la capacité de produire des composés volatils en quantités minimales, la capacité d'accumuler des huiles essentielles est une caractéristique distinctive des familles de plantes spécifiques dans le règne végétal. Notamment, les dicotylédones telles que les Apiacées (coriandre), les Astéracées (camomille), les Géraniacées (géranium), les Illiciacées (anis), les Lamiacées (menthe), les Lauracées (cannelle), les Myrticacées (muscade), Myrtacées (eucalyptus), Oléacées (jasmin), Rosacées (rose), Santalacées (bois de santal) et Rutacées (citron) sont importants à cet égard. De plus, les monocotylédones, en particulier les familles des Poacées (vétiver) et des Zingibéracées (gingembre), jouent également un rôle important dans ce contexte. (**Boukhatem et al ., 2019**).

Les résultats de l'étude indiquent que le rendement en huile essentielle des graines de coriandre est de 0,13%. Ce chiffre correspond à la fourchette indiquée par Ramezani et al. (2009), qui ont démontré que le rendement en huiles essentielles des graines de coriandre varie de 0,14 à 0,37%. De plus, **Ravi et al. (2007)** ont rapporté un rendement allant jusqu'à 0,82%, et **Zheljzakov et al. (2008)** ont observé un rendement maximal de 0,95% dans diverses accessions. Ces variations de rendement sont principalement attribuées à des facteurs génétiques associés au matériel végétal, à l'emplacement géographique et aux conditions climatiques, comme l'ont noté les auteurs susmentionnés.

3.1.2.pH

Le pH ou « potentiel d'hydrogène » mesure l'activité chimique des ions H⁺ en solution. Le pH mesure l'acidité ou la basicité d'une solution. Cette méthode décrit l'acidité ionique du produit à analyser.

Le pH des huiles essentielles des graines de coriandre est égale 6 (PH *acide* < 7). Notre résultat est concordance avec les résultats rapportés par **Ouis, (2015)**. Il convient de souligner que le pH joue un rôle déterminant au cours des réactions chimiques et biochimiques et peut influencer les propriétés stabilisatrices d'une huile essentielle (effets antioxydant et antimicrobien) par conséquent, ce résultat peut amener à un bon caractère stabilisateur contre les microorganismes ; ce qui permettra à ces HE de jouer le rôle de conservateurs dans les produits alimentaires.

3.1.2. Densité relative

La densité relative de cette HE étant de 0,9. Elle est donc inférieure à celle de l'eau. Ce résultat est supérieur à celui trouvé par **Gandova et al. (2020)**, qui ont fait une étude sur les huiles essentielles du coriandre et qui ont obtenues une valeur de 0.8623.

3.1.3. Indice de réfraction

L'indice de réfraction est un paramètre d'identification qualitatif et un moyen de vérifier le niveau de pureté des huiles essentielles (Hellal, 2011). Chaque substance a son indice de réfraction spécifique. Plus l'indice de réfraction d'un produit est proche de la valeur attendue, plus sa pureté est grande. L'indice de réfraction de notre huile essentielle est de 1,3682. Généralement, l'indice de réfraction des huiles essentielles est élevé. Ce résultat est supérieur à celui de l'eau, qui est de 1,3356 à 20°C, et inférieur à celui de l'huile d'olive à 20°C, qui est de 1,4684. Cela indique leur richesse en composants qui dévient la lumière polarisée.

Les résultats sont inférieurs aux résultats rapportés par **Ouis. (2015)** ; **Kostova et al. (2020)** et **Ghazanfari et al. (2020)**, qui ont travaillés aussi sur l'huile essentielles des graines de coriandre, ils ont trouvés des valeurs de : 1.468,1.462 et 1, 465 respectivement. Cet indice dépend de la composition chimique qui augmente en fonction des longueurs des chaînes d'acides, de leurs degrés d'insaturation et de la température, il varie essentiellement avec la teneur en monoterpènes et en dérivés oxygénés. Une forte teneur en monoterpènes donnera un indice élevé.

Le faible indice de réfraction qui est de 1,36 indiquent que l'huile de coriandre a une faible réfraction de la lumière, ce qui pourrait favoriser leur utilisation dans les produits cosmétiques (**Mantel et al., 1995**).

3.2. Activités antioxydantes

Les propriétés antioxydantes des huiles essentielles (HE) ont suscité une attention considérable en raison de leur potentiel en tant qu'alternatives naturelles aux antioxydants synthétiques. Plusieurs études ont souligné l'efficacité de divers huiles essentielles dans l'élimination des radicaux libres et l'inhibition de l'oxydation des lipides, ce qui les rend précieux pour la conservation des aliments et les applications liées à la santé.

La mesure de l'absorbance a été effectuée par spectrophotométrie à 517 nm. Les pourcentages d'inhibition ont été calculés. Les valeurs obtenues ont permis de tracer les courbes représentant la variation du pourcentage d'inhibition en fonction des concentrations de notre huile de coriandre et celle de l'acide gallique (**Figures 25 et 26**).

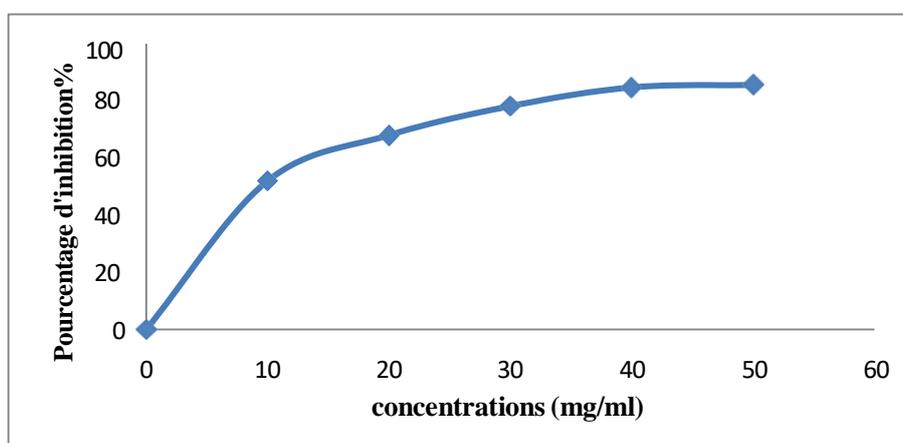


Figure 22: Pourcentage d'inhibition du DPPH en fonction des concentrations de l'huile essentielle de *Coriandrum sativum*.

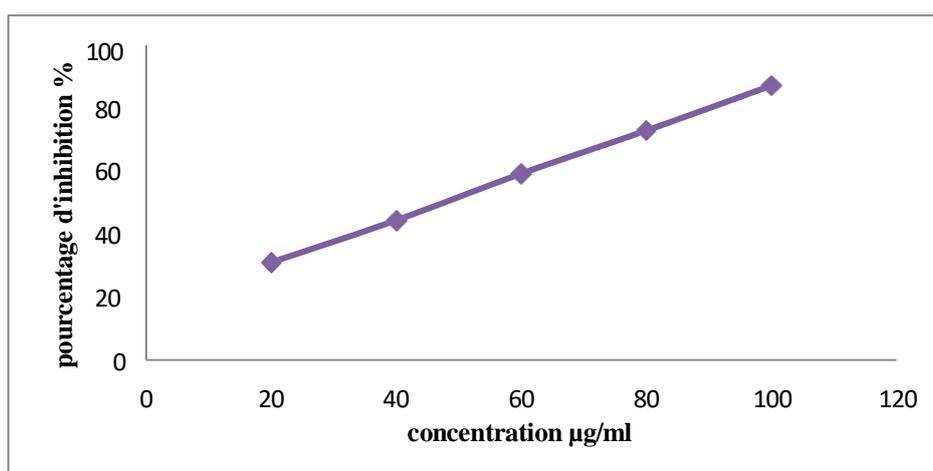


Figure 23: Activité anti radicalaire de l'acide gallique.

Le test de piégeage des radicaux DPPH a été effectué pour examiner l'effet de différentes concentrations de l'huile essentielle des graines de coriandre (10, 20, 30, 40, 50, 25, 50, mg / mL) comme antioxydants. Comme on peut le voir sur la Fig. 23, l'activité de piégeage des radicaux libres la plus élevée a été démontrée avec une concentration de 50 µg/mL (85,57%) suivie de 40 µg/mL (80,4%), 30 µg/mL (77,4%) et 20 µg/mL (62,12%) et a 10µ/ml (51,55%).

Le pourcentage d'inhibition du radical libre augmente avec l'augmentation de la concentration soit pour l'acide gallique ou pour l'HE de *Coriandrum sativum*. Pour une concentration de 0.1 mg/ml, l'acide gallique a révélé un pourcentage d'inhibition du radical libre DPPH de 87% ±1.65, tandis que pour la concentration d'HE des graines de coriandre de 50 µg/ml, le pourcentage d'inhibition obtenue est de 85.57±2.10%.

Détermination d'IC₅₀

IC₅₀ est inversement lié à la capacité antioxydant d'un composé, car il exprime la quantité d'antioxydant requise pour diminuer la concentration du radical libre de 50%. Plus la valeur d'IC₅₀ est basse, plus l'activité antioxydante d'un composé est grande. Les calculs des IC₅₀ sont schématisés dans les figures 24 .

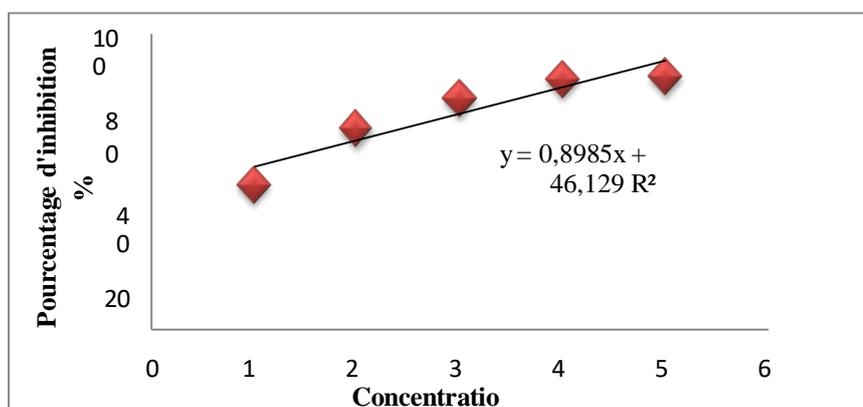


Figure 24: IC 50 pour l'huile essentielle de *Coriandrum sativum*.

Les valeurs d'IC₅₀ déterminées graphiquement en mg/ml exprimant la concentration efficace L'HE sont présentées dans **le Tableau 15**.

Tableau 15: Résultats du test antioxydant exprimant la concentration efficace 50% en mg/ml.

HE/standard	IC ₅₀ ± écart type
<i>Coriandrum sativum</i>	4.30±0.87
Acide gallique	0.047±1.02

D'après les valeurs d'IC₅₀ obtenues par le test de DPPH, l'IC₅₀ de l'essence des graines de coriandre est de 4.3mg/ml, A partir des résultats obtenus, le pouvoir anti radicalaire de l'huile essentielle testées reste reculé par rapport à celui du contrôle positif (acide gallique) qui révèle une valeur d'IC₅₀ de 0.04mg/ml ce qui reflète sa grande capacité antioxydante.

3.3. Activités antimicrobiennes

L'activité antimicrobienne est révélée par l'absence ou la présence d'une zone d'inhibition autour du disque identique à la gélose stérile.

Les résultats sont exprimés selon quatre niveaux d'activité :

Non sensible : $D < 8$ mm, Sensible : $9 \text{ mm} \leq D \leq 14$ mm, Très sensible : $15 \leq D \leq 19$ mm,

Extrêmement sensible :

$D \geq 20$.

3.3.1. Sensibilité des souches bactériennes à l'huile essentielle des graines de la coriandre

L'effet antibactérien vis-à-vis des souches bactériennes examinées a été évalué par la méthode de diffusion en milieu solide (aromatogramme), ce teste permet de juger qualitativement l'activité antibactériennes de notre huile essentielle à partir de la mesure de diamètres de zones d'inhibitions apprissent autour des disques qui contiennent les différentes huiles essentielles. Les valeurs de zones d'inhibitions des différentes testes sont regroupées dans **le tableau 16**.

Tableau 16: Diamètres des zones d'inhibition des huiles de la coriandre contre les souches bactériennes

Microorganismes	Zone d'inhibition (mm)
<i>Escherichia coli</i> ATCC 25992	15
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> ATCC 9027	–
<i>Micrococcus luteus</i> ATCC 4698	13,5
<i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 25923	15,5

il a été noté que toutes les souches exposées présentaient des degrés variables de sensibilité à l'huile essentielle de graines de coriandre, avec des zones d'inhibition allant de 13,5 à 15 mm, à l'exception du genre *Pseudomonas aeruginosa*, qui présentait une résistance à l'huile et manquait d'un halo d'inhibition.

De plus, l'absence d'activité antimicrobienne pourrait être attribuée à la résistance développée par un nombre important de souches, chacune réagissant différemment à divers types d'huiles essentielles. Notamment, parmi les souches étudiées, *P. aeruginosa* présentait une résistance. Cette résistance est attribuée à la résistance intrinsèque de la bactérie aux agents biocides, liée à la nature de sa membrane externe, composée de lipopolysaccharides formant une barrière imperméable aux composés hydrophobes. En présence d'agents perméabilisant la membrane externe, des substances précédemment inactives contre *P. aeruginosa* devient actif (Mann et al, 2000). Il semble que cette souche présente une résistance à une large gamme d'huiles essentielles (**Hammer et al, 1999; Deans et Ritchie, 1987**).

De plus, la résistance observée de *P. aeruginosa* concorde avec la littérature existante, indiquant son insensibilité générale aux huiles essentielles (**Carson et Riley, 1995; Arora et al., 1999; Hammer et al., 1999**). Cette résistance a déjà été documentée par Chalchat et al (1997), où l'espèce présentait une insensibilité à 13 huiles essentielles testées. De plus, cette bactérie a montré une résistance aux huiles essentielles d'*Ocimum gratissimum* (Nakamura et al, 1999), de *Salvia tomentosa* (**Haznedaroglu et al., 2001**), *Achillea Millefolium* (Candan et coll., 2003), *Ammoïde spusilla* (**Laouer, 2004**) , et diverses autres huiles essentielles.

Selon Reddy et al. (2012), les huiles essentielles de *Coriandrum sativum* ont démontrés uneactivité prononcée contre les bactéries à Gram positif et à Gram négatif, comparable

aux antibiotiques standard testés dans des conditions similaires.

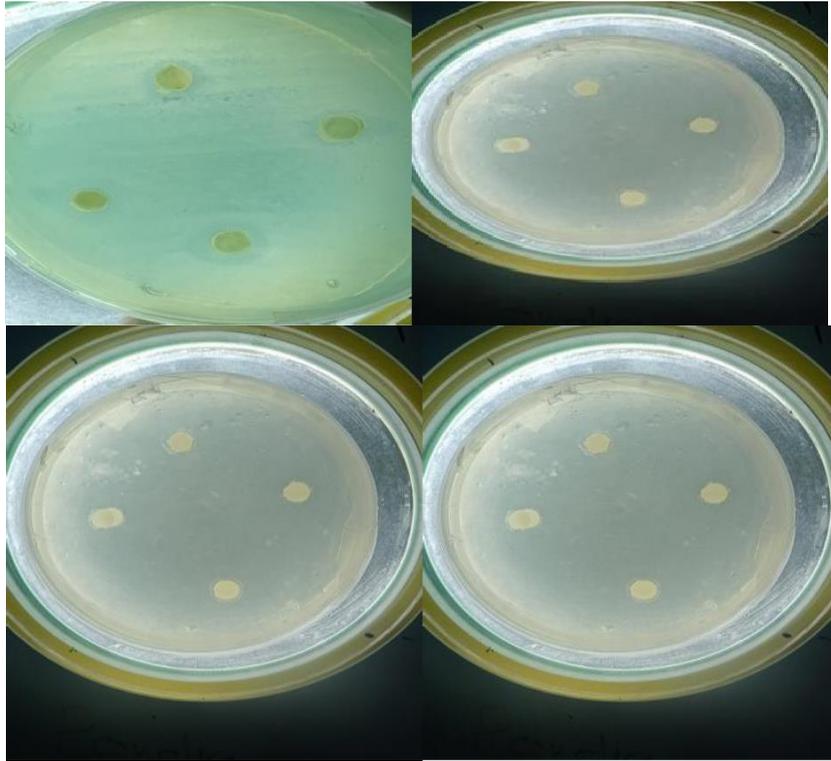


Figure 25 : Zones d'inhibition de l'extrait sur certaines bactéries (*Escherichia coli*, *Micrococcus luteus*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Enterococcus luteus*)

Il a été constaté que l'HE est plus actif sur *Staphylococcus aureus* avec une zone d'inhibition de 15,5 mm, *E. coli* avec une zone d'inhibition de 15 mm et *Micrococcus luteus* qui est le moins sensible avec une zone d'inhibition de 13,5 mm. Nos résultats sont inférieurs à ceux rapportés par **Kachetel et Sahmi (2017)**.

Les différences des résultats pourraient être attribuées à la nature même de la composition chimique de l'huile. Selon **Oussalah et al. (2006)**, l'activité biologique d'une huile essentielle est à mettre en relation avec sa composition chimique, les groupes fonctionnels des composés majoritaires (alcools, phénols, aldéhydes) et les effets synergiques entre les composants. Ainsi les composés chimiques les plus efficaces et qui possèdent un large spectre d'action antimicrobienne sont les phénols (thymol, carvacrol et eugénol), les alcools (α -terpinéol, terpinen-4-ol, menthol, géraniol, linalol), les aldéhydes (géraniol, citral et néral), les cétones (carvone, pulégone et camphre) (**Moleyar et Narassimham, 1992 ; Dorman et Deans, 2000; Oussalah et al., 2006**).

La différence entre nos résultats obtenus et ceux rapportés par la littérature est peut être due à la nature de la matière végétale (l'espèce, origine géographique), qualité des souches testées et le niveau de pureté du produits finale (HE) et sa conservation. (Menaceur,2015).

Tableau 17: Représente les diamètres d'inhibitions de chaque bactérie vis-à-vis des antibiotiques testés.

Antibiotiques	<i>NO</i> ₃₀	<i>AMC</i> ₃₀	<i>C</i> ₃₀	<i>Rp</i> ₁₅	<i>GEN</i> ₁₀	<i>E</i> ₂
<i>E. Coli</i>	21 mm	20 mm	20,5 mm	23 mm	24 mm	21,5 mm
<i>Pseudomonas</i>	34 mm	37 mm	38,5 mm	34,5 mm	29 mm	26,5 mm
<i>Micrococcus</i>	-	19,5 mm	14 mm	20,5 mm	23 mm	13 mm
<i>Staphylococcus</i>	24,5 mm	23 mm	24,5 mm	35,5 mm	28,5 mm	29,5 mm

Les figures 26, 27,28 et 29 représentent les représentations graphiques des diamètres d'inhibitions de chaque bactérie vis à vis des antibiotiques testés.

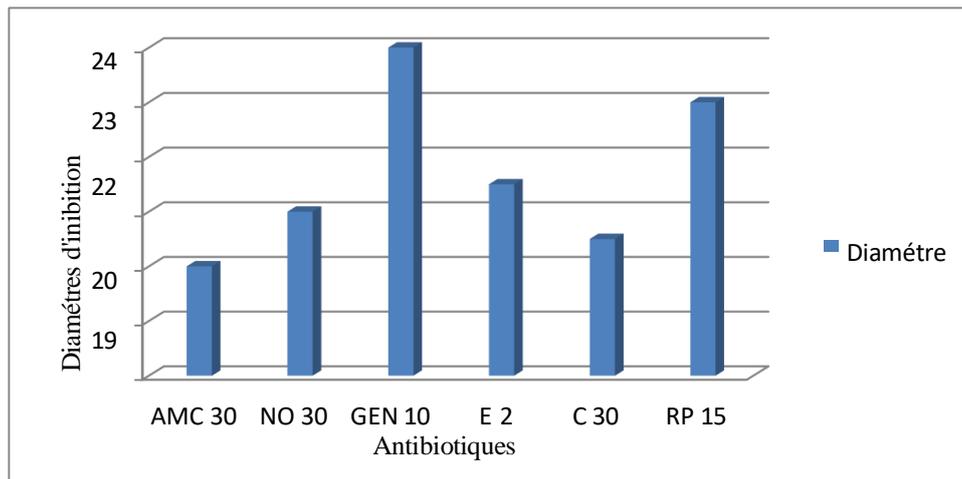


Figure 26: Représentation graphique des diamètres d'inhibition d'*E.coli* vis-à-visde différents antibiotiques.

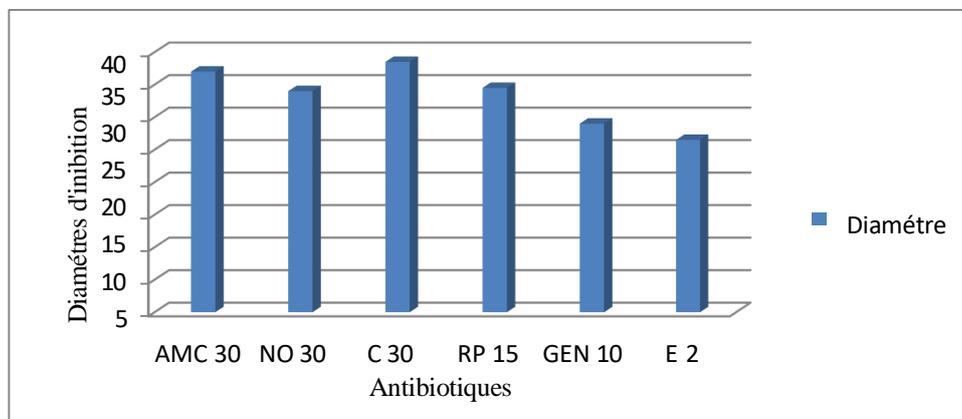


Figure 27: Représentation graphique des diamètres d'inhibition de *Pseudomonas aerogénosa* vis- à-vis de différents antibiotiques.

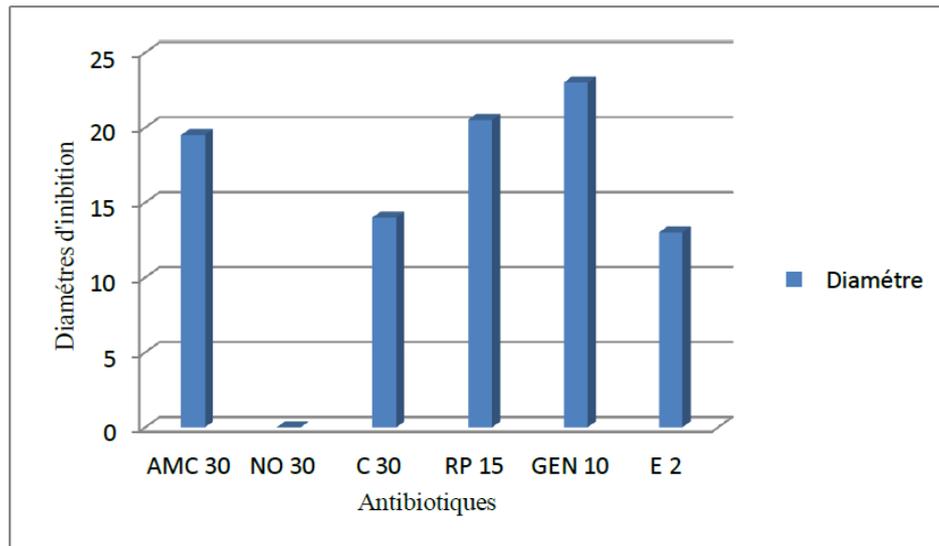


Figure 28: Représentation graphique des diamètres d'inhibition de *Micrococcus Luteus* vis-à-vis de différents antibiotiques.

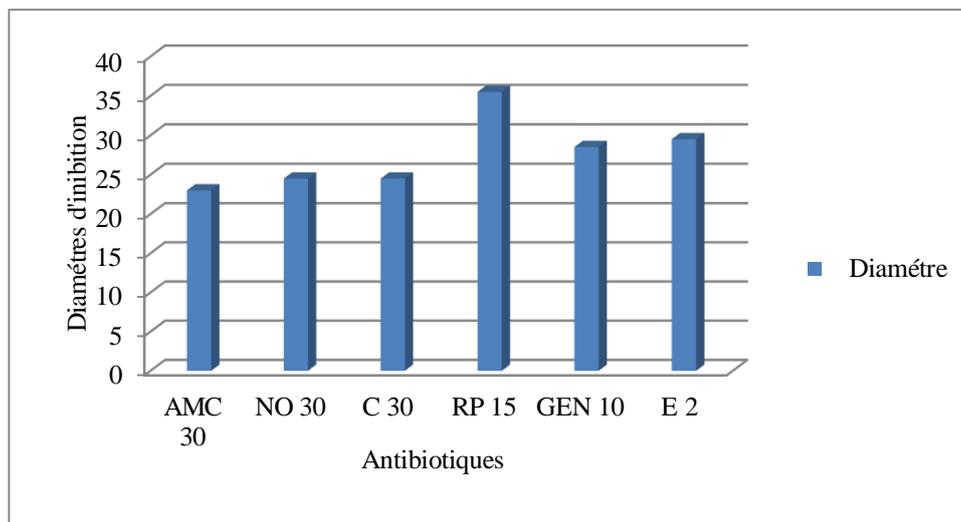


Figure 29: Représentation graphique des diamètres d'inhibition de *S.aureus* vis-à-vis des différents antibiotiques.

De plus, la bibliographie référence des études analysant l'activité antimicrobienne de l'huile essentielle de *Coriandrum sativum* contre certains germes testés dans cette étude. Les résultats varient d'une étude à l'autre et sont présentés dans le tableau ci-dessous.:

Tableau 18 : Activité antimicrobienne de l'HE étudiée par d'autres auteurs. **Kachetel et Sahmi, (2017).**

Etude (diamètre d'inhibition) Souche microbienne	Mandal <i>et al.</i> (2015) (15µl/disque)	Ouis, (2015) (10µl/disque)	Alves <i>et al.</i> . (20µl de Linalol extrait del'HECS /disque)
<i>Staphylococcus aureus</i>	-	22,1 mm	-
<i>Escherichia coli</i>	25 mm	16,7 mm	-
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	10 mm	13 mm	-
<i>Acinetobacter baumannii</i> (différentes souches)	-	-	LMG 1025 : 63,5±2,1 mm LMG 1041 : 24,5±0,7 mm AcB 10/10 : 20,0±0,0 mm AcB 23/10 : 24,5 ± 0,7 AcB 24/10 : 50,0 ± 1,4 mm

- Le diamètre d'inhibition de *Staphylococcus aureus* testé est inférieur au diamètre d'inhibition de *Staphylococcus aureus* trouvé par **Ouis. (2015)**;
- Le diamètre d'inhibition d'*Escherichia coli* testé est inférieur au diamètre d'inhibition d'*Escherichia coli* trouvé par **Ouis,(2015)**et par **Mandal S et Mandal M.(2015)** ;
- La principale différence entre les résultats de ces études et ceux de la nôtre est que *Pseudomonas aeruginosa* testé dans ces études est sensible à l'HECS contrairement aux résultats qu'on a obtenus.

Dorman et Deans. (2000) ont démontré que l'activité bactéricide des H.E. vis-à-vis des cellules bactériennes pouvait être expliquée par une dénaturation des protéines provoquée par le rôle solvant et déshydratant des huiles essentielles (**Boubrit, 2007**).

3.3.2. Sensibilité des souches fongiques à l'huile essentielle des graines de coriandre

Les propriétés antifongiques de l'huile essentielle et de l'extrait de coriandre sur *F. oxysporum* sont présentées dans le **tableau 19**.

Tableau 19: Diamètres (mm) des zones d'inhibition de l'huile essentielle des graines decoriandre relative aux souches FOS testées.

Concentration	Diamètres d'inhibition	Sensibilité de souche	Images
500mg/ml	45 mm	(+++) Extrêmement sensible	
250mg/ml	20,5 mm	(+++) Extrêmement sensible	
125mg/ml	20 mm	(+++) Extrêmement sensible	
62,5mg/ml	11,5 mm	(+) sensible	

31,25mg/ml	7,5 mm	- Résistance	
------------	--------	--------------	---

Fusarium oxysporum est un champignon phytopathogène, agent de la fusariose vasculaire qui affecte de nombreuses plantes cultivées.

D'après le **tableau 19**, l'activité antifongique pour l'huile essentielle montre une forte activité contre *Fusarium oxysporum* surtout pour la concentration de 500 mg/ml avec une zone d'inhibition de 45mm et absence de zone d'inhibition pour la plus faible concentration qui est de 31.25mg/ml. L'huile essentielle de coriandre avait des propriétés antifongiques élevées à des concentrations de 125mg/ml.

Les zones d'inhibition augmentent avec l'augmentation des concentrations, Cette action inhibitrice est dite « dose dépendante ». Cette sensibilité est probablement en relation avec les concentrations élevées en métabolites secondaires (flavonoïdes, polyphénols) de l'extrait. Ces composés peuvent traverser les membranes cellulaires des souches fongiques et pénétrer ainsi à l'intérieur de la cellule et interagissent avec des sites critiques intracellulaire, tels que les enzymes et les protéines, ce qui conduit à la mort cellulaire. (**Cristani et al., 2007**).

Des résultats similaires ont été observés par **Lalitha et al. (2011)**, ils ont constaté que les huiles essentielles de la graine de coriandre ont montré une excellente activité antifongique contre les agents pathogènes du paddy présents dans les semences notamment *Fusarium oxysporum*.

L'huile essentielle de coriandre s'est avérée inhiber les souches de Candida (**Silva et al., 2011**) et a montré des résultats prometteurs comme agent antifongique alternatif (**Laribi et al., 2015**).

L'activité antifongique de l'HE contre *Fusarium Solani* est représentée dans le **tableau 20**.

Tableau 20: Diamètres (mm) des zones d'inhibition de l'huile essentielle des graines decoriandre relative aux souches FS testées.

Concentrations	Diamètres d'inhibition	Sensibilité de souche	Images
500mg/ml	15 mm	(++) très sensible	
250mg/ml	14 mm	(+) sensible	
125mg/ml	12,5 mm	(+) sensible	
62,5mg/ml	11,5mm	(+) sensible	

31,25mg/ml	10,5mm	(+) sensible	
------------	--------	--------------	---

D'après le tableau, on observe que le développement du *Fusarium Solani* n'est pas fortement affecté par les différentes concentrations de l'HE des graines de coriandre (31,25 ; 62,5 ; 125 ; 250 ; 500 mg/ml). Toutes les concentrations même la plus faible agit sur ce champignon.

Des résultats similaires ont été rapportés par **Daferea et al. (2002)**, qui ont évalué l'activité antimicrobienne de 8 essences aromatiques sur des souches phytopathogènes. Le développement de *Botrytis cinerea*, de *Fusarium solani* et *Clavibacter michiganensis* a été complètement inhibé par différentes concentrations d'huiles essentielles.

3.3. L'activité anti-inflammatoire *in vitro* :

Pour évaluer l'effet anti-inflammatoire de l'huile essentielle de graines de coriandre (HE) *in vitro*, nous avons examiné la capacité des huiles essentielles à inhiber la dénaturation induite par la BSA. Les résultats de l'inhibition de la dénaturation de la BSA par l'huile et l'étalon sont représentés sur **la figure 30**. L'étude a montré une inhibition de la dénaturation des protéines (BSA) dépendante de la concentration de *Coriandrum sativum* L, avec des gammes de concentration allant de 50 à 500mg /ml.

L'analyse de l'histogramme révèle que le pourcentage d'inhibition de la dénaturation de la BSA par l'huile essentielle des graines de coriandre dépasse celui du standard, le diclofénac sodique (50 mg), à différentes concentrations. Par exemple, à 50 mg / ml, les pourcentages d'inhibition de la dénaturation de la BSA par l'OE et l'étalon sont respectivement de 80% et 63,2%. Cela indique que l'activité d'inhibition de la dénaturation de l'huile dépasse celle de la norme utilisée. Le médicament de référence, Diclorofénac, a également présenté une inhibition de la dénaturation des protéines dépendante de la concentration.

Il est important de noter que le processus d'agrégation de l'albumine est influencé par divers facteurs, notamment la température, le pH et la concentration (**Aymard et al.; 1996**).

De plus, il convient de mentionner que l'effet anti-dénaturant de l'extrait est inversement proportionnel à la concentration. Le pourcentage d'inhibition le plus élevé pour l'OE (80%) est atteint à la concentration la plus faible (50 mg/ml).

Ces résultats coïncident avec les résultats de **Williams *et al* ;(2008)**, et **Reffas et Slimani, (2019)** selon lesquels l'activité anti dénaturante, des composés naturels isolés à partir des plantes, est plus importante lorsque la concentration est faible.

Une étude sur l'effet anti-dénaturation des protéines de l'extrait méthanolique de pelure de *Citrus nobilis* (**Malik et al., 2021**) a obtenu un pourcentage d'inhibition d'environ 85 % à la concentration la plus élevée (200 mg/mL).

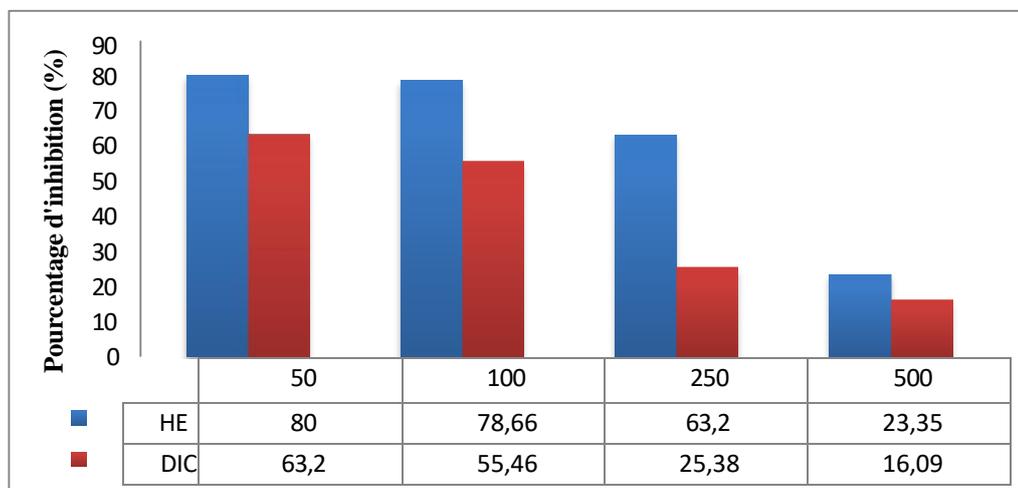


Figure 30 : Pourcentages d'inhibition de la dénaturation de BSA par l'extrait et le standard (Diclofénac sodique).

Conclusion :

Les plantes aromatiques constituent une source insoupçonnée de molécules bioactives pouvant constituer une alternative aux agents antimicrobiens conventionnels (Medjani et Maguemoun, 2017). La flore algérienne présente une biodiversité considérable et possède de nombreuses plantes aromatiques et médicinales riches en métabolites secondaires aux caractéristiques thérapeutiques et pharmacologiques.

La flore algérienne présente une biodiversité considérable, elle possède de nombreuses plantes aromatiques et médicinales riches en métabolites secondaires avec des caractéristiques thérapeutiques et pharmacologiques. Dans ce contexte, le travail que nous avons entrepris porte sur l'étude chimique et biologique de l'huile essentielle des graines de coriandre, plante appartenant à la famille des Apiaceae. (**Bekkara et al., 1998**).

L'hydrodistillation, méthode privilégiée pour l'extraction des huiles essentielles, a permis de démontrer que le rendement de l'essence extraite des graines de coriandre s'élève à 0,13 %. L'analyse des propriétés physico-chimiques, telles que la densité relative et l'indice de réfraction, a révélé des valeurs conformes aux normes de commercialisation des huiles essentielles établies par diverses pharmacopées, et s'est avérée cohérente avec certains travaux antérieurs.

L'huile essentielle des graines a démontré une relation dose-réponse significative dans l'élimination des radicaux libres, atteignant jusqu'à 87,7 % à 50 µg/mL. Elle présente également des activités intéressantes contre certaines bactéries pathogènes et champignons testés, avec des diamètres d'inhibition variant entre 13,5 et 45 mm, mais sans effet inhibiteur sur *Pseudomonas aeruginosa*. Ces caractéristiques en font une ressource précieuse à préserver et à valoriser.

L'activité anti-inflammatoire de cette huile essentielle révèle un fort potentiel pharmacologique, justifiant son usage dans le traitement des inflammations et comme nouvelle molécule anti-inflammatoire. Cette étude pourrait être approfondie par des tests in vivo afin d'évaluer d'autres activités thérapeutiques, telles que les effets antidiabétiques, antihypertenseurs ou antitumoraux.

Parmi les perspectives immédiates de cette recherche, il serait pertinent de déterminer les concentrations minimales inhibitrices de cette huile, ainsi que d'étudier son pouvoir antibactérien et antifongique sous forme de vapeurs sur plusieurs souches microbiennes. Une application potentielle

serait la désinfection de l'air contaminé des hôpitaux ou des systèmes de ventilation des bâtiments. En outre, l'exploitation de ces huiles dans l'industrie agroalimentaire pourrait permettre de substituer certains additifs chimiques de conservation par ces composés naturels.

Parmi les perspectives immédiates de cette étude, est de déterminer les concentrations minimales inhibitrices cette huile et d'évaluer ainsi que l'étude du pouvoir antibactérien et antifongique des vapeurs de ces huiles sur plusieurs souches microbiennes en vue d'une éventuelle désinfection de l'air contaminée des hôpitaux ou des canaux d'aération des bâtiments. L'exploitation de ces huiles dans l'industrie agro-alimentaire en substituant les additifs chimiques de conservation par ces additifs naturels

Conclusion générale

Conclusion générale

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.

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.

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. Les procédés de séchage thermique, qui jouent un rôle important dans l'industrie alimentaire, reposent souvent sur l'utilisation de l'énergie thermique. Cependant, ces techniques peuvent entraîner des modifications structurelles des produits. Par conséquent, de nouveaux traitements permettant de maintenir la qualité font actuellement l'objet d'une grande attention. C'est le cas de l'application des ultrasons de forte puissance, une technologie jeune et prometteuse. Afin d'améliorer les phénomènes de transfert de chaleur et de masse dans les processus de séchage, les ultrasons puissants sont considérés comme une technologie nouvelle et prometteuse (**Inyang et al., 2018**).

Nous avons utilisé une méthode appelée méthodologie de surface de réponse pour étudier comment trois facteurs – la quantité de solvant, la force des micro-ondes et la durée

du processus-affectent l'extraction du TPC et du TAC de Coriander sativum. Nous avons constaté que les trois facteurs avaient un impact important sur la quantité de PTC et de TAC que nous pouvions obtenir. Nos résultats expérimentaux correspondaient à ce que nous avions prédit, montrant que notre méthode fonctionne bien pour obtenir le TPC et le TAC des feuilles de coriandre. Ce processus rapide et efficace pourrait être utile pour obtenir des substances importantes dans la recherche et l'industrie.

Le comportement du séchage des feuilles de coriandre a été étudié pour cinq températures d'air de séchage dans une étuve ventilée (40, 80 et 100 et 120°C) et cinq niveaux de puissance des micro-ondes (100, 300 et 500W, 700 et 900W). Il a été constaté qu'une réduction significative du temps et des taux de séchage et des diffusivités élevés étaient possibles. Parmi les modèles utilisés pour prédire la MR des feuilles de coriandre, le modèle de Midilli et al., s'est avéré être le meilleur modèle avec un R^2 ajusté ≥ 0.999 .

Il a été démontré que l'utilisation des ultrasons comme prétraitement facilite l'élimination de l'eau lors des processus de séchage. Cette application réduit le temps de séchage et améliore la diffusivité de l'humidité dans les tranches de coriandre. Le modèle de Midilli et al. s'avère le plus adapté pour le séchage US-MW des échantillons non traités aux ultrasons, en raison de son R^2 élevé et des valeurs de RMSE et de chi-deux les plus faibles.

L'application des ultrasons avant le séchage entraîne la rupture des cellules et des dommages aux tissus des tiges, ce qui facilite l'évacuation de l'eau durant le processus de séchage. De plus, une prolongation du temps d'exposition aux ultrasons permet de réduire le temps de séchage global jusqu'à 42,5 %. Les traitements ultrasonores favorisent également la conservation des nutriments, en particulier en augmentant la teneur en polyphénols totaux. L'utilisation des ultrasons comme traitement préliminaire avant le séchage peut améliorer de manière significative la qualité des produits agricoles.

Conclusion générale

donne un pourcentage d'inhibition très important (80%) par rapport au Diclofénac (63%) confirmant ainsi sa propriété anti-inflammatoire. Ce qui supporte son usage dans le traitement des inflammations et comme nouvelle molécule anti-inflammatoire.

Ainsi, l'utilisation d'ultrasons dans le séchage combiné aux microondes semble être une technologie prometteuse pour améliorer la qualité et les économies d'énergie. Comme cette technologie semble plus efficace à basse température, les effets sur la qualité liés aux températures élevées peuvent être évités sans compromettre la cinétique du processus. Les ultrasons à haute intensité semblent également être plus efficaces à de faibles vitesses d'air, ce qui est très intéressant pour accélérer la cinétique de séchage des produits qui ont tendance à subir un durcissement pendant le séchage. L'existence d'un seuil d'intensité des ultrasons affectant le procédé est un point important à considérer lors de la planification d'expériences, que ce soit au laboratoire ou à l'échelle industrielle.

Références bibliographiques

1. **Abou, E.S., N. Lithy, H.E., El-Saeed, N. A., Wahby, G. S. M., Khalil, M. S., Abou El-Kassem M.Y., Shaffie, L.T., 2012.** Efficacy of *Coriandrum sativum* L. essential oil as antidiabetic. *J ApplSci Res*, 8(7), 3646-55.
2. **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.
3. **Adiletta, G., Russo, P., Senadeera, W., Di Matteo, M.** Drying characteristics and quality of grape under physical pretreatment. *J. Food Eng.* 2016, 172, 9–18
4. **Ahmad S. S., Morgan M.T. Okos M. R., 2001.** Effects of microwave drying, checking and mechanical strength of baked biscuits. *Journal of Food Engineering*, 63-75.
5. **Ahmed, J.; Shivhare, U. S.; Singh, G. 2001.** Shorter Communication: Drying Characteristics and Product Quality of Coriander Leaves. *Food and Bioproducts Processing* 79(C2),103-106.
6. **Akpinar, E.K., 2006.** Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. *Journal of Food Engineering*, 73(1), 75-84.
7. **Akpinar, E.K., Bicer, Y., Yildiz, C. 2003.** Thin layer drying of red pepper. *Journal of Food Engineering*, 59(1), 99-104.
8. **Alibas, I., 2007.** Microwave, air and combined microwave–air-drying parameters of pumpkin slices. *LWT-food science and technology*, 40(8), 1445-1451.
9. **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.
10. **Allaf, K., Mounir, S., Allaf, T.,2012.** Swell-drying: séchage et texturation par DIC des végétaux.
11. **Arora, D. S., Kaur, J.,1999.** Antimicrobial activity of spices. *International journal of antimicrobial agents*, 12(3), 257-262.

12. **Ashika, B.D.; Chitrani, L.R.; Naresh, S.; Sunil, K.S.; Akki, S.; Balasubramanian, S.** Phytochemical studies on the methanolic extract of coriander sativum leaves-an invitro approach. *Eur. J. Biomed. Pharm. Sci.* 2018, 5, 494–500.
13. **Aymard, P., Durand, D., Nicolai, T. 1996.** The effect of temperature and ionic strength on the dimerisation of β -lactoglobulin. *International journal of biological macromolecules*, 19(3), 213-
14. **Bachir Bey, M.; Meziant, L.; Benchikh, Y.; Louaileche, H.** Deployment of response surface methodology to optimize recovery of dried dark fig (*Ficus carica* L., var. Azenjar) total phenolic compounds and antioxidant activity. *Int. Food Res. J.* 2014, 21, 1477–1482.
15. **Bajpai, M.A., Pande, S., and Prakash, D., 2005 .** Phenolic Contents and Antioxidant Activity of Some Food and Medicinal Plants. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 56, 287-291.
16. **Balasundram, N., Sundram, K., Samman, S., 2006.** Phenolic compounds in plants and agriindustrial by-products: Antioxidant activity, occurrence, and potential uses. *Food chemistry*, 99(1), 191-203.
17. **Bantle, M., Eikevik, T.M. A., 2014.** study of the energy efficiency of convective drying systems assisted by ultrasound in the production of clipfish. *Journal of Cleaner Production* ; 65 : 217-223.
18. **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.
19. **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.
20. **Begnami, A. F., Duarte, M. C. T., Furletti, V., Rehder, V. L. G. 2010.** Antimicrobial potential of *Coriandrum sativum* L. against different *Candida* species in vitro *Food Chemistry* Volume, 118 (1) : 74.
21. **Belghit, A., Kouhila, M. and Boutaleb, B. C., 2000.** Experimental study of drying kinetics by forced convection of aromatic plants. *Energy Conservation and Management* 44(12): 1303-1321.
22. **Boeing, J.S.; Barizão, É.O.; Silva, B.S.; Montanher, P.F.; Almeida, V.D.C.;**

- Visentainer, J.V.** Evaluation of solvent effect on the extraction of phenolic compounds and antioxidant capacities from the berries: Application of principal component analysis. *Chem. Cent. J.* 2014, 8, 48. [CrossRef]
- Boekel, M.A.J.S.V. and Tijssens, L.M.M. (2001).** Kinetics Modelling. Chapter Three, Wageningen University
23. **Bonazzi, C., Dumoulin, E. and Bimbenet, J.-J.2008.**Le séchage des produits alimentaires. *Industrie Alimentaire Agricole*, 125, 12-22.
24. **Borisov, Y. Y., and Gynkina, N. M., 1973.** Acoustic drying. In : Rosenger, L. D. (ed.), *Physical principles of ultrasonic technology*, Vol. 2, pp. 381–474. New York, NY, Plenum Press
25. **Bossart, L. 2006.** Contribution à l'optimisation du séchage en lit fluidisé. Thèse de doctorat, Université Libre de Bruxelles. Brussels .
26. Bouallegue, A.; Casilloc, A.; Chaari, F.; Cimini, D.; Corsaro, M.M.; Bachoual, R.; Ellouz-Chaabouni, S. Statistical optimization of levan: Influence of the parameter on levan structure and angiotensin I-converting enzyme inhibitory. *Int. J. Biol. Macromol.* 2020, 158, 945–952. [CrossRef]
27. **Bouallegue, A.; Casilloc, A.; Chaari, F.; Cimini, D.; Corsaro, M.M.; Bachoual, R.; Ellouz-Chaabouni, S.** Statistical optimization of levan: Influence of the parameter on levan structure and angiotensin I-converting enzyme inhibitory. *Int. J. Biol. Macromol.* 2020, 158, 945–952.
26. **Boubrit, S., Nafaa, B., 2007.** Détermination " in vitro " du pouvoir antibactérien des huiles essentielles d'Eucalyptus, Myrte, Clous de girofle et Sarriette, et leur application à la conservation de la viande fraîche type hachée. Mémoire d'Ingénieur d'état en biologie, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 96p.
27. **Bougerra, A.2012.** Etude des activités biologiques de l'huile essentielle extraite des grains de *Folniculum vulgare* Mill. En vue de son utilisation comme conservateurs alimentaire. thèse de Magister. Option : biotechnologies alimentaires. Institut de la nutrition, de l'alimentation et des technologies agro-alimentaire. P43.
28. **Boukhatem, M. N., Ferhat, A., Kameli, A. 2019.** Méthodes d'extraction et de distillation des huiles essentielles : revue de littérature. *Une*, 3(4), 1653-1659.
29. **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.

30. **Bozkır, H.; Ergün, A.R.; Serdar, E.; Metin, G.; Baysal, T.** Influence of ultrasound and osmotic dehydration pretreatments on drying and quality properties of persimmon fruit. *Ultrason. Sonochem.* 2019, 54, 135–141.
31. Brand-Williams, W.; Cuvelier, M.E.; Berset, C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *Food Sci. Technol.* 1995, 28, 25–30. [CrossRef]
32. **Brasiello, A. ; Adiletta, G. ; Russo, P. ; Crescitelli, S. ; Albanese, D.; Di Matteo, M.** Mathematical modeling of eggplant drying: Shrinkage effect. *J. Food Eng.* 2013, 114, 99–105.
33. **Bruneton, J.,1999.** Pharmacognosie, phytochimie, plantes médicinales, 3^{ème}éd. Lavoisier, Paris, 1120.
34. **Buffler, C. R., 1993.** Microwave Cooking and Processing. Engineering Fundamentals for the Food Scientist. Aspen Publishers. Newyork, 220p.
35. **Çalışkan, O., Polat A., 2011.** Phytochemical and antioxidant properties of selected fig (*Ficus carica* L.) accessions from the eastern Mediterranean region of Turkey. *Scientia Horticulturae*. Volume 128, Issue 4, Pages 473-478.
36. **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.
37. **Candan, F., Unlu, M., Tepe, B., Daferera, D., Polissiou, M., Sökmen, A., Akpulat,**
38. **Cárcel, J. A., de la Fuente, S. and Mulet, A. (2006b).** Effect of air temperature on convective drying assisted by high power ultrasound. *Defect and Diffusion Forum*, 258–260, 563–574.
39. **Cárcel, J. A., Garcia-Perez, J. V., Riera, E., Mulet, A., 2011.** Improvement of convective drying of carrot by applying power ultrasound—Influence of mass load density. *Drying Technology*, 29,174–182.
40. **Carcel, J.A., Garcia Perez, J.V., Riera, E., Mulet, A., 2007.** Influence of high-intensityultrasound on drying kinetics of persimmon. *Drying Technology* 25, 185– 193.
41. **Carson C.F; Riley T.V., 1995.** Antimicrobial activity of the major components of the essential oil of *Melaleuca alternifolia* J. *ApplBacteriol*, 78(3) : 264-269.
42. **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.

43. **Ceaglske, N.H., Hougen, O.A. 1937.** Drying granular solids. *Industrial & Engineering Chemistry*, 29(7), 805-813.
44. **Chakraverty, A. 2003.** Conversion and utilization of biomass. In: *Handbook of postharvest technology: cereals, fruits, vegetables, tea, and spices*, (Eds.) H.S. Ramaswamy, G.S.V. Raghavan, A. Chakraverty, A.S. Mujumdar, Marcel Dekker. New York, 797-819.
45. **Chalchat, J. C., Garry, R. P., Menut, C; Lamaty, G., Malhuret, R., Chopineau, J., 1997.** Correlation between chemical composition and antimicrobial activity. VI. Activity of some African essential oils. *Journal of essential oil research*, 9(1), 67-75.
46. **Chandra, P.K., Singh, R.P., 1994.** Applied numerical methods for food and agricultural engineers. CRC Press, Boca Raton; 512 p.
47. **Chareau, A., Cavallé, R. 1995.** Théorie et calculs. *Techniques de l'Ingénieur*, J2480, 25 p.
48. **Chareau, A., Cavallé, R. 1995.** Théorie et calculs. *Techniques de l'Ingénieur*, J2480, 25 p.
49. Cheng, Y.; Xue, F.; Yang, Y. Hot water extraction of antioxidants from tea leaves—Optimization of brewing conditions for preparing antioxidant-rich tea drinks. *Molecules* 2023, 28, 3030. [CrossRef].
50. Cheok, C.Y.; Chin, N.L.; Yusof, Y.A.; Talib, R.A.; Law, C.L. Optimization of total phenolic content extracted from *Garcinimangostana* Linn. hull using response surface methodology versus artificial neural network. *Ind. Crops Prod.* 2012, 40, 247–253. [CrossRef]
51. **Chithra, V., Leelamma, S. 1999.** *Coriandrum sativum* .Changes the levels of lipid peroxides and activity of antioxidant enzymes in experimental animals. *Indian Journal of Biochemistry and Biophysics*, 36: 59-61.
52. **Chithra, V., Leelamma, S. 2000.** *Coriandrum sativum* – effect on lipid metabolism in 1,2-dimethyl hydrazine induced colon cancer. *Journal of Ethnopharmacology*, 71, 457– 463.
53. **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.
54. **Cioanca, O., Hritcu, L., Mihasan, M., Trifan, A., Hancianu, M., 2014.** Inhalation of coriander volatile oil increased anxiolytic–antidepressant-like behaviors and decreased oxidative status in beta-amyloid (1–42) rat model of Alzheimer's disease. *Physiology &*

behavior, 131, 68-74.

55. **Cristani, M., D'Arrigo, M., Mandalari, G ;Castelli, F ; Sarpietro, M. G ; Micieli, D;&Trombetta, D. 2007.** Interaction of four monoterpenes contained in essential oils with model membranes: implications for their antibacterial activity. *Journal of agricultural and foodchemistry*, 55(15), 6300-6308.
56. **Dahmoune, F., Boulekbache, L., Moussi, K., Aoun, O., Spigno, G., Madani, K., 2013.** Valorisation of citrus limon residues for the recovery of antioxydants: Evaluation and optimization of microwave and ultrasound application to solvent extraction.
57. **Darughe, F., Barzegar, M., Sahari, M. A. 2012.** Antioxidant and antifungal activity of Coriander (*Coriandrum sativum L.*) essential oil in cake. *International Food Research Journal*, 19(3), 1253-1260.
58. **Das, A.; Basak, S.; Chakrabartty, S.; Dhibar, M. Microwave: An ecologically innovative,green extraction technology. Curr. Anal. Chem. 2022, 18, 858–866. [CrossRef].**
59. **De la Fuente-Blanco, S., Riera-Franco de Sarabia, E., Acosta-Aparicio, V. M.,Blanco-Blanco, A., Gallego-Juárez, J. A., 2006.** Food drying process by power ultrasound.*Ultrasonics*, 44, e523–e527.
60. **Dean, J.R. Extraction Techniques for Environmental Analysis: Microwave-Assisted Extraction;** John Wiley & Sons Ltd.: Hoboken, NJ, USA, 2022; pp. 205–217.
61. **Deans, S. G., Ritchie, G.,1987.** Antibacterial properties of plant essential .
62. **Dear, E.K. 2006.** Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. *Journal of Food Engineering*, 73(1), 75-84.
63. **Deepa, B., Anuradha, C. V. 2011.** Antioxidant potential of coriander sativum L seed extract. *Journal of Experimental Biology*, 49: 30-38.
64. **Demir, V., Gunhan, T., Yagcioglu, A.K., 2007.** Mathematical modelling of convection drying of green table olives. *Biosystems Engineering*, 98(1), 47-53.
65. **Deschepper, R.2017 .** Variabilité de la composition des huiles essentielles et intérêt de la notion chémotype en aromathérapie. thèse de doctorat. option : pharmacie. Université de Marseille .p 11
66. **Dewanto, V., Wu, x., Kafui k. A, Rui hai liu., 2012.** Thermal Processing Enhances the Nutritional Value of Tomatoes by Increasing Total Antioxidant Activity. *J. Agric. Food Chem.* 2002, 50, 3010–3014.

67. **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.
68. **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.
69. **Djerroud, D., 2010.** Modélisation markovienne du séchage continu par contact avec agitation (Doctoral dissertation).
70. **Dong, P.Y., Cui Q.J., Fang, T.T., Huang, Y., H. Wang., 2019.** Occurrence of antibiotic resistance genes and bacterial pathogens in water and sediment in urban recreational water. *J. Environ. Sci.*, 77 (2019), pp. 65-74.
71. **Ferraz, V. P ; Chagas, E. A ; & De Melo Filho, A. A., 2019.** Chemical composition of essential oil of Coriander seeds (*Coriandrum sativum*) cultivated in the Amazon Savannah, Brazil. *Chemical Engineering Transactions*, 75, 409-414.
72. **Doymaz, I.; Ismail, O.** Drying characteristics of sweet cherry. *Food Bioprod. Process.* 2011, 89, 31–38.
73. **Doymaz, I. 2004.** Effect of pre-treatments using potassium metabisulphide and alkaline ethyl oleate on the drying kinetics of apricots. *Biosystems Engineering* 83, 281-287.
74. **Doymaz, I. 2005.** Thin-layer drying behaviour of mint leaves. *Journal of Food Engineering* 74, 370-375.
75. **Doymaz, I. 2012.** Evaluation of some thin-layer drying models of persimmon slices (*Diospyros kaki* L.). *Energy Conservation and Management* 56 : 199-205.
76. **Dridi, F. 2005.** Extraction et analyse de l'huile essentielle de cumin formulation d'une pommade de congestionnant. Thèse de Magister. Option : Chimie appliquée. Université Mohammed Bouguerra Boumerdes. P 54-55.
77. **Drouzas, A. E., Schubert, H., 1996.** Microwave application in vacuum drying of fruits. *Journal of Food Engineering*, 28, 203–209. drying methods on volatiles of Chinese ginger (*Zingiber officinale* Roscoe). *Food and Bioproducts Processing*, 90(3), 515-524.
78. **Dudez, P., Thémelin, A., Reynes, M. 1996.** Le séchage solaire petite échelle des fruits et légumes: expériences et procédés. Édition du Gret, Paris; 157 p.
79. **Duval, L. 2012.** Les huiles essentielles à l'officine. Thèse de doctorat .UFR de médecine et de pharmacie de Rouen. P69

80. **E. (2006a).** Ultrasonic drying of foodstuff in a fluidized bed: Parametric study. *Ultrasonics*, 44, 539–543.
81. **Elgayyar, M., Draughon, F. A., Golden, D. A., Mount, J. R. 2001.** Antimicrobial activity of essential oil from plants against selected pathogenic and saprophytic microorganisms. *Journal of Food Protection*, 64 :1019-1024.
82. **Elmastas M., Gulcin I., Isildak O., Kufriveoglu I.O., Ibaoglu K.and Enein A.H.Y., 2006.** Radical scavenging activity and antioxidant activity of Bay leaf extracts.*Journal of Iranian Chemical Society*,3 :258-266.
83. **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.
84. **Erbay, Z., Icier, F. 2010.** A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50(5), 441-464.
85. **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.
86. **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.
87. **Falade, K. O., Igbeka, J. C., 2007.** Osmotic dehydration of tropical fruits and vegetables.*Food Reviews International*, 23, 373–405.
88. **Fenandes, F.A.N., Rodrigues, S., 2008b.** Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure: melon dehydration. *LWT* 41, 604–610.
89. **Fenandes, F.A.N., Rodrigues, S., 2008c.** Dehydration of Sapota (*Achras sapota* L.) using ultrasound as pretreatment. *Drying Technology* 26, 1232–1237.
90. **Fernandes, F A.N., Linhares, Jr., Rodriguez S., 2008 .** Ultrasound as pre-treatment for drying of pineapple. *Ultrasonics Sonochemistry* : 15.1049–1054.
91. **Fernandes, F. A. N., Gallão, M. I.,Rodrigues, S. (2008)(a).** Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure : Melon dehydration. *LWT— Food Science and Technology*, 41(4), 604–610.
92. **Fernandes, F. A. N., Oliveira, F. I. P., & Rodrigues, S., 2008(c).** Use of ultrasound for dehydration of papayas. *Food and Bioprocess Technology*, 1(4), 339–345.

93. **Fernandes, F.A.N., Rodrigues, S., 2007.** Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: dehydration of banana. *Journal of Food Engineering* 82, 261–267.
94. **Fernandes, F.A.N., Rodrigues, S., 2009.** Application of ultrasound and ultrasound-assisted osmotic dehydration in drying of fruits. *Drying Technology: An International Journal*, 26(12), 1509–1516.
95. **Filliat, P., 2012.** Les plantes de la famille des Apiacées dans les troubles digestifs.
96. **Floros, J. D., and Liang, H. (1994).** Acoustically assisted diffusion through membranes and biomaterials. *Food Technology*, December, 79– 84.
97. **Forzato, C.; Vida, V.; Berti, F. Biosensors and Sensing Systems for Rapid Analysis of Phenolic Compounds from Plants: A Comprehensive Review.** *Biosensors* 2020, 10, 105. [CrossRef] [PubMed]
98. **Gallego-Juarez, J. A., 1998.** Some applications of air-bone power ultrasound to food processing. In M. J. W. Povey, & T. J. Mason (Eds.), *Ultrasound in food processing* (pp. 127–143). Glasgow, UK: Blackie Academic & Professional.
99. **Gallego-Juárez, J. A., Rodríguez-Corral, G., Moraleda, J. C. G., Yang, T. S., 1999.** A new high-intensity ultrasonic technology for food dehydration. *Drying Technology*, 17, 597–608.
100. **Gallego-Juarez, J.A., Riera, E., Fuento Blanco, S.D.L., Rodriguez, C.G., Acosta, A.V.M., Blanco, A., 2007.** Application of high-power ultrasound for dehydration of vegetables: Process and devices. *Drying Technology* 25, 1893–1901.
101. **Gandova, V., Tasheva, S., Marinova, K., Dimov, M., Dobрева, K., Prodanova-Stefanova, V., Stoyanova, A., 2020.** Investigation of Chemical Composition, Thermodynamic and Thermal Properties of Coriander (*Coriandrum sativum*. L) Essential Oil. *Oxid Commun*, 43(1), 85.
102. **García-Baños, B.; Reinoso, J.J.; Peñaranda-Foix, F.L. Temperature assessment of microwave-enhanced heating processes.** *Sci. Rep.* 2019, 9, 10809. [CrossRef] [PubMed].
103. **García-Pérez, J. V., Cárcel, J. A., Bedito, J., & Mulet, A. (2007).** Power ultrasound mass transfer enhancement in food drying. *Food and Bioproducts Processing*, 85(3), 247-254.
104. **García-Pérez, J. V., Cárcel, J. A., Bedito, J., Riera, E., and Mulet, A., 2008.** Drying of a low porosity product (carrot) as affected by power

ultrasound. Defect and Diffusion Forum, 273– 276, 764–769.

105. García-Pérez, J. V., Cárcel, J. A., de la Fuente-Blanco, S., Riera-Franco de Sarabia,
106. **Garcia-Perez, J.V., Carcel, J.A., Benedito, J., Mulet, A. (2007).** Power ultrasound mass transfer enhancement in food drying. Food and Bioproducts Processing 85, 247–254.
107. **Garcia-Perez, J.V., Carcel, J.A., Riera, E., Mulet, A. 2009.** Influence of the applied acoustic energy on the drying of carrots and lemon peel. Drying Technology 27, 281– 287.
108. **Ghazanfari, A., Emami, S., Tabil, L.G., Panigrahi, S. 2006.** Thin-layer drying of flax fiber: II. Modeling drying process using semi-theoretical and empirical models. Drying Technology, 24(12), 1637-1642.
109. **Ghedira, K., Goetz, P., 2015.** Coriandrum sativum L.(Apiaceae) : Coriandre. Phytothérapie, 13(2), 130-134.
110. **Ghestem, A., Seguin, E., Paris, M., Orecchioni, A. M., 2001.** Le préparateur en pharmacie, dossier 2, Botanique, Pharmacognosie, Phytothérapie. Homéopathie. Ed. TEC et DOC.
111. **Glenn TL.** Dynamic analysis of grain drying system. Ohio State University, Ann Arbor
112. **Goyal, R. K., Kingsly, A. R. P., Manikantan, M. R. and Ilyas, S. M. 2006.** Thin-layer drying kinetics of raw mango slices. Biosystems Engineering 95(1) : 43- 49.
113. **Grysole, J., 2004.** La commercialisation des huiles essentielles. Manuel pratiques huiles essentielles : de la plante à la commercialisation, 139-141.
114. **Gupta, S.V. and Patil, N., 2014.** Convective Drying of Osmo-Dehydrated Sapota Slice. International Journal of Agricultural and Food Science, 5, 219-226.
115. **Gustavo, V.B.-C., Humberto, V.-M. 1996.** Dehydration of foods. Chapman & Hall, New York; 339 p. Hall, C.W. 1980. Drying and storage of agricultural crops. Carl W. Hall, Avi Publishing Company, Inc., Westport CT; 396 p
116. **H. A., 2003.** Antioxidant and antimicrobial activity of the essential oil and methanol extracts of Achillea millefolium subsp. Millefolium Afan. (Asteraceae). Journal of ethnopharmacology, 87(2-3), 215-220.
117. **Habibur, R., Chinna, E Swaraiah, M., and Dutta, A.M., 2015.** In-vitro anti-inflammatory and anti-arthritis activity of Oryzasativa Var. JohaRice (An Aromatic Indigenous Rice of Assam). American-Eurasian J. Agric. Et Environ. Sci, 15
118. **Hamadou, F., Touki, S., 2017.** Extraction, caractérisation des huiles essentielles des

épices : Girofle, poivre noire. Thèse de Master. Option : Génie de procédés. Université kasdi Marbah ouargla.p14.

119. **Hamrouni-Sellami I., Rahali F. Z., Bettaieb, R., Bourgou, S., Limam, F., Marzouk, B., 2012.** Total Phenolics, Flavonoids, and Antioxidant Activity of Sage (*Salvia officinalis* L.) Plants as Affected by Different Drying Methods. *Food Bioprocess Technol*
120. **Harrison, D. L. 1980.** Microwave versus conventional cooking methods: Effects on food quality attributes. *Journal of Food Protection*. 43,633-637.
121. **Hayat, K.; Hussain, S.; Abbas, S.; Farooq, U.; Ding, B.; Xia, S.** Optimized microwave-assisted extraction of phenolic acids from citrus mandarin peels and evaluation of antioxidant activity in vitro. *Separ. Puri. Technol.* 2009, 70, 63–70. [CrossRef]
122. **Haznedaroglu, M. Z., Karabay, N. U., Zeybek, U., 2001.** Antibacterial activity of *Salvia tomentosa* essential oil. *Fitoterapia*, 72(7), 829-831.
123. **Heller, R., Esnault, R. and Lance, C., 1993.** *Physiologie Végétale 1. Nutrition*. 5e Edition de l'Abrégé. Masson, Paris.
124. **Henderson, S.M., 1974.** Progress in Developing the Thin Layer Drying Equation. *Transactions of the ASAE*, 17(6), 1167-1168.
125. **Henderson, S.M., Pabis, S., 1962.** Grain drying theory: IV the effect of airflow rate on drying index. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 7(2), 85-89.
126. **Henry, P.S.H. 1948.** The diffusion of moisture and heat through textiles. *Discussions of the Faraday Society*, 3, 243-257.
127. **Hihat, S.; Remini, H.; Madani, K.** Effect of oven and microwave drying on phenolic compounds and antioxidant capacity of coriander leaves. *Int. Food Res. J.* 2017, 24, 503– 509.
128. **Hwang, E., Lee, D. G., Park, S. H., Oh, M. S., Kim, S. Y. 2014.** Coriander leaf extract exerts antioxidant activity and protects against UVB-induced photoaging of skin by regulation of procollagen type I and MMP-1 expression. *Journal of medicinal food*, 17(9), 985-995.
129. **Inchuen S., Narkrugsa W., Pornchaloempong P., Chanasinchana P., Swing T., 2008.** Microwave and hot air drying of Thai red curry paste. *Maejo International Journal of Science and Technology*, 1: 38–49.
130. **Inchuen, S., Narkrugsa, 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.

131. **Isao, K., Ken-Ichi, F., Aya, K., Ken-Ichi, N., Tetsuya, A. 2004.** Antibacterial activity of coriander volatile compounds against *Salmonella choleraesuis*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(11): 3329-3332.
132. **Jabeen, Q., Bashir, S., Lyoussi, B., Gilani, A. 2009.** Coriander fruit exhibits gut modulatory, blood pressure lowering and diuretic activities. *Journal of Ethnology and Pharmacology*, 122(1):123-130.
133. **Jarayaman K.S., Das Gupta D.K. 1992,** Dehydration of fruits and vegetables– Recent developments in principles and techniques, *Drying Technol.* 10 (1) 1–50.
134. **Jayaraman, K.S., Das Gupta, D.K. 2006.** Drying of fruits and vegetables. In: *Handbook of industrial drying*, (Ed.) A.S. Mujumdar, CRC Press. Florida, United States, 606-634.
135. **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
136. **Jha, A.K.; Sit, N. Extraction of bioactive compounds from plant materials using combination of various novel methods: A review.** *Trends Food Sci. Technol.* 2022, 119, 579–591. [CrossRef]
137. **Jiménez-Moreno, N.; Volpe, F.; Moler, J.A.; Esparza, I.; Ancín-Azpilicueta, C.** Impact of Extraction Conditions on the Phenolic Composition and Antioxidant Capacity of Grape Stem Extracts. *Antioxidants* 2019, 8, 597. [CrossRef] [PubMed]
138. **Johnson, A.C.; Ali Al Mukhaini, E.M.** Drying studies on peach and strawberry slices. *Cogent Food Agric.* 2016, 2, 1141654.
139. **Kachetel, L., Sahmi, A., 2017.** Étude de l'activité antimicrobienne de l'huile essentielle extraite des fruits de *Coriandrum sativum* L. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri. Tizi-Ouzou. P14.
140. **Kadri Adel, Zarai Zied, Békir Ahmed, Gharsallah Néji, Damak Mohamed, Gdoura Radhouane., 2011.** Chemical composition and antioxidant activity of *Marrubium vulgare* L. essential oil from Tunisia. *Afr J Biotechnol* 10(19) : 3908–14.
141. **Kaleemullah, S. 2002.** Studies on engineering properties and drying kinetics of chillies. Thesis, Tamil Nadu Agricultural University ; Coimbatore.
142. **Kang, M.H.; Lee, J.S.; Kim, H.Y.; Kwon, S.; Choi, Y.S.; Chung, H.R.; Kwak, T.K.; Cho Y.H.** Selecting items of a food behavior checklist for development of Nutrition Quotient (NQ) for children. *Korean J. Nutr.* 2012, 45, 372–389. [CrossRef]

143. **Karathanos, V.T. 1999.** Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, 39(4), 337-34
144. **Kassem, A.S. 1998.** Comparative studies on thin layer drying models for wheat. In *Proceedings: Management and ergonomic; 13th International Congress on Agricultural Engineering Rabat, Morocco, February, 2-6.*
145. **Keey, R.B. 1972.** *Drying principles and practice.* Pergamon Press, Oxford; 402 p.
146. **Kerdudo, A. 2014.** Optimisation de la conservation des cosmétiques : impact de la formulation, recherche de nouveaux conservateurs naturels, encapsulation (Doctoral dissertation).
147. **Khraisheh, M.A., Cooper, T.J.R., Magee T.R.A., 1997.** Microwave and air drying Fundamental considerations and assumptions for the simplified thermal calculations of volumetric power absorption. *Journal of Food Engineering*. Volume 33, Issues 1–2, , Pages 207-219 .
148. **King, C.J. 1968.** Rates of moisture sorption and desorption in porous, dried foodstuffs. *Food Technol.*, 22, 165-171.
149. **Knorr, D., Zenker, M., Heinz, V., Lee, D. U., 2004.** Applications and potential of ultrasonics in food processing. *Trends in Food Science & Technology*, 15, 261– 266.
150. **Koç, B.; Eren, I.; Kaymak-Ertekin, F.** Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: The effect of drying method. *J. Food Eng.* 2008, 85, 340–349.
151. **Kostova, I., Lasheva, V., Georgieva, D., Damyanova, S Fidan, H; Stoyanova, A., Gubenia, O. 2020.** Characterization of active paper packaging materials with coriander essential oil (*Coriandrum sativum* L). *Journal of Chemical Technology, Metallurgy*, 55(6).
152. **Kouhila, M., Kechaou, N., Otmani, M., Fliyou, M. and Lahsasni, S. 2002.** Experimental study of sorption isotherms and drying kinetics of Moroccan Eucalyptus Globulus. *Drying Technology* 20(10): 2027-2039.
153. **Kowalski, S.J. ; Mierzwa, D.** Numerical analysis of drying kinetics for shrinkable products such as fruits and vegetables. *J. Food Eng.* 2013, 114, 522–529.
154. **Krajayklang, M., Klieber, A. and Dry, P.R., 2001.** Acceleration of the drying rates of paprika fruit with drying oil and cutting. *International. Journal of Food Science. and Technology*. 36: 207-214.
155. **Krokida, M. K.; Karathanos, V. T.; Maroulis, Z. B.; Marinos-Kouris, D. 2003.** Drying kinetics of some vegetables. *Journal of Food Engineering* 59, 391- 403.

156. **Kubo, M., Sakio, H., Shimano, K., Ohno, K.,** (2004). Factors influencing seedling emergence and survival in *Cercidiphyllum japonicum*. *Folia Geobotanica* 39, 225-234..
157. **Lalitha, V., Kiran, B., Raveesha, K. A.,** 2011. Antifungal and antibacterial potentiality of six essential oils extracted from plant source. *Int J Eng Sci Technol*, 3(4), 3029-3038.
158. **Laouer, H., Zerroug, M. M., Sahli, F., Chaker, A. N., Valentini, G., Ferretti, G., Anaya, J.,** 2003. Composition and antimicrobial activity of *Ammoidespusilla* (Brot.) Breistr. Essential oil. *Journal of Essential Oil Research*, 15(2), 135-138.
159. **Lattanzio, v., di Venere, d., Linsalata, v., Bertolini, p., Ippolito, A., Salerno, M. ,** 2001. Low temperature metabolism of apple phenolics and quiescence of *Phlyctaena vagabunda*. *J. Agric. Food Chem.* 49, 5817- 5821.
160. **Leighton, T. G. (1998).** The principles of cavitation. In: Povey, M. J. W., and Mason, Li, H.; Deng, Z.; Wu, T.; Liu, R.; Loewen, S.; Tsao, R. Microwave-assisted extraction of phenolics with maximal antioxidant activities in tomatoes. *Food Chem.* 2012, 130, 928–936.[CrossRef].
161. **Linhares, Jr., Fernandes, F.A.N., F.E., Rodrigues, S.,** 2008a. Ultrasound as pretreatment for drying of pineapple. *Ultrasonics Sonochemistry* 15, 1049–1054. Fernandes, F.A.N., Oliveira, F.I.P., Rodrigues, S., 2008b. Use of ultrasound for dehydration of papayas. *Food Bioprocess Technology* 1, 339–345.
162. **López-Salazar, H.; Camacho-Díaz, B.H.; Ocampo, M.L.A.; Jiménez-Aparicio, A.R.** Microwave-assisted extraction of functional compounds from plants: A Review. *Bioresources* 2023, 18, 6614–6638. [CrossRef]
163. **Madrau, Monica A., Piscopo, Amalia., Sanguinetti, Anna M., Del Caro, Alessandra., et al.** 2009. Effect of drying temperature on polyphenolic content and antioxidant activity of apricots.
164. **Mandal, S., Mandal, M. 2015.** Coriander (*Coriandrum sativum* L.) essential oil: Chemistry and biological activity. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 5(6), 421-428.
165. Marinova, D.; Ribarova, F.; Atanassova, M. Total phenolics and total flavonoids in Bulgarian fruits and vegetables. *J. Univ. Chem. Technol. Metal.* 2005, 40, 255–260.
166. **Maskan, M., 2000.** Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering*, 44, 71–78.
167. **Maskan, M., 2001.** Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during

- hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 48, 177–182.
168. **Mason, T. J., and Lorimer, J. P., 2002.** Applied sonochemistry. The uses of power ultrasound in chemistry and processing. Weinheim, Wiley- VCH.
169. **Mason, T.J ,1998.** Power ultrasound in food processing-the way forward, in: M.J.W. Povey, T. Mason (Eds.), *Ultrasounds in Food Processing*, Blackie Academic and Professional, London,
170. **Mason, T.J., Riera, E., Vercet, A., Lopez-Buesa, P., 2005.** Application of Ultrasound, in *Emerging Technologies for Food Processing*, D.-W. Sun, Editor. USA: Elsevier ;,p. 323-351.
171. **Medhin, D. G., Bakos, P., Hadhazy, P. 1986.** Inhibitory effects of extracts of *Lupinus termis* and *Coriandrum sativum* on electrically induced contraction of the rabbit ear artery. *Acta Pharmaceutica Hungarica*, 56:109-113.
172. **Medjani, C., Maguemoun, K.,** Extraction, analyse et évaluation de l'activité antimicrobienne de l'huile essentielle de la cannelle de chine. Mémoire de Master
173. **Menaceur, F.2015.**Contribution à l'étude phytochimique et biologique de l'érigeron, du fenouil commun, de la lavande et du genévrier. Thèse doctorat. Option: Sciences alimentaires. Ecole nationale supérieure agronomique El-harrach- Alger.p160.
174. **Midilli, A., Kucuk, H., Yapar, Z., 2002.**A new model for single layer drying. *Drying Technology* 20, 1503–1513.
175. **Miranda, M., Maureira, H., Rodriguez, K., & Vega-Gálvez, A., 2009.** Influence of temperature on the drying kinetics, physicochemical properties, and antioxidant capacity of Aloe Vera (*Aloe Barbadensis* Miller) gel. *Journal of Food Engineering*, 91, 297–304.
176. **Mirzaee, E., Rafiee, S., Keyhani, A. 2010.** Evaluation and selection of thin- layer models for drying kinetics of apricot (cv. NASIRY). *Agricultural EngineeringInternational: CIGR Journal*, 12(2), 111-116.
177. **Moleyar, V., Narasimham, P., 1994.** Modified atmosphere packaging ofvegetables: an appraisal. *Journal of Food Science and Technology, India*, 31(4), 267
178. **Momin, A.H., Sawapnil,S., Acharya , Amit, V., Gajjar.2012.** *Coriandrum sativum*-review of advances in phytopharmacology. Vol. 3(5): 1233-1239.
179. **Mousa, N. and Farid, M., 2002.** Microwave vacuum drying of banana slices. *Drying Technology* 20 : 2055–2066.
180. **Mujamdar A.S., Menom A.S., 1995.** Drying of solids: Principles classification and selection of dryers, *Handbook of Industrial Drying A* 1–40.

181. **Mujumdar, A. S., 2014.** 15 Impingement Drying. Handbook of Industrial Drying, 371.
182. **Mujumdar, A.S., 2006.** Handbook of industrial drying. CRC Press, Florida, United States; 1308 p.
183. **Mulet, A., Cárcel, J. A., Sanjuán, N., and Bon, J. (2003).** New food drying technologies – use of ultrasound. Food Science and Technology International, 9, 215– 221.*
184. **Mulet, A., Cárcel, J.A., Sanjuán, N., Bon, J. 2003.** New Food Drying Technologies - Use of Ultrasound. Food Science and Technology International. 9(3) :215-221.
185. **Mulet, A., Sanjuán, N., Bon, J., and Simal, S., 1999.** Drying model of highly porous hemispherical bodies. European Food Research and Technology, 210, 80–83.
186. **Myers, R.H.; Montgomery, D.C.; Anderson-Cook, C.M.** Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments, 3rd ed.; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2009; ISBN 978-1-118-91601-8.
187. **Nakamura, A., Yoshizaki, I., Kobayashi, S., 1999.** Spatial expression of Drosophila Glutathione S-transferase-D1 in the alimentary canal is regulated by the overlying visceral mesoderm. Development, growth & differentiation, 41(6), 699- 702.
188. **Nhut, P.T.; Quyen, N.T.N.; Truc, T.T.; Minh, L.V.; An, T.N.T.; Anh, N.H.T.** Preliminary study on phytochemical, phenolic content, flavonoids and antioxidant activity of *Coriandrum Sativum* L. originating in Vietnam. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2020, 991, 012022. [CrossRef].
189. **Nowacka, M., A. Wiktor., 2012.** "Drying of ultrasound pretreated apple and its selected physical properties." Journal of Food Engineering 113(3): 427-433
190. **Nowacka, M., Wedzik, M., 2016.** Effect of ultrasound treatment on microstructure, colour and carotenoid content in fresh and dried carrot tissue. Appl. Acoust. 103, 163– 171. oils. International journal of food microbiology, 5(2), 165-180.
191. **Oliveira, F., Gallão, M., Rodrigues, S., Fernandes, F., 2011.** Dehydration of Malay apple (*Syzygium malaccense* L.) using ultrasound as pre-treatment. Food and Bioprocess Technology, 4(4), 610–615.
192. **Oliveira, F., Gallão, M., Rodrigues, S., Fernandes, F., 2011.** Dehydration of Malay apple (*Syzygium malaccense* L.) using ultrasound as pre-treatment. Food and Bioprocess Technology, 4(4), 610–615.
193. **OMS. 2008.** Statistique sanitaires mondiales .Données de l'observation de la santé mondiale .Bibliothèque de l'organisation mondiale de la santé .p119 oregano. Chinese Cinnamon,

and Savory Essential Oils against Cell Membranes and Walls of *Escherichia coli*, 157, H7.

194. **Ouali, Y., Sadouni, T., 2017.** Evaluation in vitro des activités antioxydant et anti inflammatoire des huiles essentielles de l'écorce de Citrus limon. Mémoire de Master. Option : sciences Biologiques. Université de Bejaïa . P21-22
195. **Ouchemoukh, S., 2012.** Caractérisation physico-chimique, profils polliniques, glucidiques et phénoliques et activités antioxydantes de miels Algériens (Doctoral dissertation, Université Abderrahmane Mira de Béjaïa).
196. **Ouis, N .2015.** Étude chimique et Biologique des huiles essentielles de coriandre, de fenouil et de persil. Thèse de doctorat. Option : Chimie organique. Université d'Oran 1.p 24-25 ; 185.
197. **Oussalah, M., Caillet, S., Saucier, L ., Lacroix, M., 2006.** Antimicrobial effects of selected plant essential oils on the growth of a *Pseudomonas putida* strain isolated from meat. *Meat science*, 73(2), 236-244.
198. **Overhults, D.G., White, G.M., Hamilton, H.E., Ross, I.J. 1973.** Drying soybeans with heated air. *Transactions of the ASAE*, 16(1), 0112-0113.
199. **Özdemir, M., Onur Devres, Y. 1999.** The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *Journal of Food Engineering*, 42(4), 225-2.
200. **Page, G.E. 1949.** Factors influencing the maximum rate of air drying shelled corn in thin-layers. Purdue University. West Lafayette, Indiana.
201. Pan, X.; Niu, G.; Liu, H. Microwave-assisted extraction of tea polyphenols and tea caffeine from green tea leaves. *Chem. Eng. Process.* 2003, 42, 129–133. [CrossRef]
202. **Parry, J.L. 1985.** Mathematical modelling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying: A review. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 32(1), 1-29.
203. **Parti, M. 1993.** Selection of mathematical models for drying grain in thin- layers. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 54(4), 339-352.
204. **Pierangeli, G. V., Windell, L. R., 2009.** Antimicrobial activity and cytotoxicity of *Chromolaena odorata* (L. f.) King and Robinson and *Uncaria perrottetii* (A. Rich) Merr. Extracts. *Journal of medicinal plants Research*, 3(7), 511-518.
205. **Platel, K., Rao, A., Saraswathi, G., Srinivasan, K. 2002.** Digestive stimulant action of three Indian spice mixes in experimental rats. *Die Nahrung*, 46 :394-398.

206. **Platel, K., Srinivasan, K., 2004.** Digestive stimulant action of spices: a myth or reality. *Indian Journal of Medical Research*, 119(5), 167.
207. **Proestos, C. Determination of Phenolic Compounds in Aromatic Plants. 2005.** Ph.D Thesis, Agricultural University of Athens, Athens, Greece .
208. **Pugin, B., and Turner, A. T. (1990).** Influence of ultrasound on reaction with metals. In: Mason, T. J. (ed.), *Advances in sonochemistry*, pp. 81–118. London, JAI Press.
209. **Pulido, R., Bravo, L., Saura-Calixto, F., 2000.** Antioxidant activity of dietary polyphenols as determined by a modified ferric reducing antioxidant power assay. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 40, 3396–3402.
210. **Purseglove, J. W., Brown, E. G., Green, C. L., Robbins, S. R. J., 1981.** Spices Vol. 2 (pp. 447-813). Longman Group Ltd.
211. **Putnik, P.; Lorenzo, J.M.; Barba, F.J.; Roohinejad, S.; Jambrak, A.R.; Granato, D.; Montesano, D.; Kovačević, D.B.** Novel Food Processing and Extraction Technologies of High-Added Value Compounds from Plant Materials. *Foods* 2018, 7, 106. [CrossRef]
212. **Ramezani, S., Rasouli, F., Solaimani, B., 2009.** Changes in essential oil content of Coriander (*Coriandrum sativum* L.) aerial parts during four phenological stages in Iran. *Journal of essential oil bearing plants*, 12(6), 683-689.
213. **Rattanachaikunsopon, P., Phumkhachorn, P., 2010.** Potential of coriander (*Coriandrum sativum*) oil as a natural antimicrobial compound in controlling *Campylobacter jejuni* in raw meat. *Journal of Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*. 74(1): 31-35.
214. **Ratti, C., 2009.** *Advances in food dehydration*. CRC Press, United States; 488 p.
215. **Ravi, R., Prakash, M., Bhat, K. K., 2007.** Aroma characterization of coriander (*Coriandrum sativum* L.) oil samples. *European Food research and technology*, 225(3), 367-374.
216. **Ravizza, R., Gariboldi, M. B., Molteni, R., Monti, E., 2008.** Linalool, a plant-derived monoterpene alcohol, reverses doxorubicin resistance in human breast adenocarcinoma cells. *Oncology reports*, 20(3), 625-630.
217. **Reddy, L. J., Reshma, D. J., Jose, B., Gopu, S., 2012.** Evaluation of antibacterial and DPPH radical scavenging activities of the leaf extracts and leaf essential oil of *Coriandrum sativum* Linn. *World J Pharm Res*, 1(3), 705-716.
218. **Reddy, L. J., Spandana, G., Beena, J., Jalli, R. D., 2012.** Evaluation of antibacterial &

- DPPH radical scavenging activities of the leaf essential oils of Pongamiapinnatta & Eucalyptus maculata. Asian Journal of Biochemical and Pharmaceutical Research, 2(3), 25-32.
219. **Reffas, I., Slimani, L., 2019.** Contribution à l'étude phytochimique et à l'évaluation de quelques activités biologiques d'un mélange d'épices "Ras EL Hanout " de la région de Biskra. Mémoire de master. Option : Biochimie appliquée. Université de Biskra. p17, 34
220. **Remache, L., Belhamri, A. 2008.** Modélisation du séchage par convection. Revue des Energies Renouvelables CISM'08 Oum El Bouaghi, 289-297.
221. Rubio, L.; Motilva, M.J.; Romero, M.P. Recent advances in biologically active compounds in herbs and spices: A review of the most effective antioxidant and anti-inflammatory active principle. *Food Sci. Nut.* 2013, 53, 943–953. [CrossRef] [PubMed]
222. **Sacilik, K., Elicin, A.K. 2006.** The thin layer drying characteristics of organic apple slices. Journal of Food Engineering, 73(3), 281-289.
223. **Sahib, N.G., Anwar, F., Gilani A.H., Hamid, A.A., Saari, N., Alkharfy, KM. 2013.** Coriander (*Coriandrum sativum* L.) : Apotential source of high-value components for functional foods and nutraceuticals- A Review. *Phytoterapy Research*, 27 1439-1456.
224. **Sakhraoui, A.; Touati, N.; Hihat, S.** Effect of Time and Temperature Storage on the Quality of unpasteurized Prickly Pear Juice Enriched with Hydro-soluble *Opuntia ficus indica* seeds Extract. *Turk. J. Agric. Food Sci. Technol.* 2023, 11, 1817–1824. [CrossRef]
225. **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.
226. **Scandar, S.; Zadra, C.; Marcotullio, M.C.** Coriander (*Coriandrum sativum*) polyphenols and their nutraceutical value against obesity and metabolic syndrome. *Molecules* 2023, 28, 4187.[CrossRef]
227. **Senadeera, W.; Adiletta, G.; Önal, B.; Di Matteo, M.; Russo, P.** Influence of different hot air drying temperatures on drying kinetics, shrinkage, and colour of persimmon slices. *Foods* 2020, 9, 101.
228. **Sharaf-Eldeen, Y.I., Blaisdell, J.L., Hamdy, M.Y. 1980.** A model for ear corn drying. *Transactions of the ASAE*, 23(5), 1261-1265.
229. **Sharma, G. P. ; Verma, R. C., Pathare, P. B., 2005.** Thin-layer infraredradiation drying of onion slices. *Journal of Food Engineering* 37, 361-366.
230. **Sharma, G.P., Prasad, S., 2006.** Specific energy consumption in microwave drying of

- garlic cloves. *Energy* 31 (12), 1585–1590.
231. **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
232. **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 of hoja y tallo de cilantro (*Coriandrum sativum*). *CYTA-Journal of Food*, 6(1), 13-19.
233. **Silva, A. S.; Almeida, F. A. C.; Gouveia, J. P. G.; Lima, E. E. 2005.** Cinética de secagem das folhas do coentro variedade verdão, p 4. En XXXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Canoas, Anais.
234. **Silva, G.D., Barros, Z.M.P., Medeiros, R.A.B., Carvalho, C.B.O., Brandão, S.C.R., Azoubel, P.M., 2016.** Pre-treatments for melon drying implementing ultrasound and vacuum. *LWT-Food Sci. Technol.* 74, 14–119.
235. **Singh, D., Tanwar, A., Agrawal, P., 2015.** An overview on coriander. *Journal of Biomedical and Pharmaceutical Research*. Volume 4, Issue 2, 2015, 67-70.
236. **Singh, R. P., Heldman, D. R., 2001.** Introduction to food engineering. Gulf Professional Publishing.
237. **Singh, R.P., Wang, C.Y. 1978.** A single layer drying equation for rough rice. in: ASAE, paper no. 3001.
238. **Singleton, V. L., Rossi, J. A. JR., 1965.** Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, 16, 144–158.
239. Singleton, V.L.; Rossi, J.A.J.R. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *Am. J. Enol. Vitic.* 1965, 16, 144–158. [CrossRef].
240. **Soysal, Y. and Öztekin, S., 2001.** Comparison of seven equilibrium moisture content equations for some medicinal and aromatic plants. *Journal of Agricultural Engineering Research* 78(1) : 57–63.
241. **Soysal, Y., Öztekin, S., Eren, Ö. Microwave drying of parsley., 2006.** modelling, kinetics, and energy aspects. *Biosystems Engineering*, 93(4), 403-413.
242. Spigno, G.; Tramelli, L.; De Faveri, D.M. Effects of extraction time, temperature and solvent on concentration and antioxidant activity of grape marc phenolics. *J. Food Eng.*

2007, 81, 200–208. [CrossRef]

243. **Srikiatden, J., Roberts, J.S. 2006.** Measuring moisture diffusivity of potato and carrot (core and cortex) during convective hot air and isothermal drying. *Journal of Food Engineering*, 74(1), 143-152.
244. **T. J. (eds.),**Ultrasound in food processing, pp. 155–182. London, Chapman and Hall.
245. **Tarleton, E. S., Wakeman, R. J.,1998.** Ultrasonically assisted separation process. *Ultrasounds in food processing*. London : Blackie Academic and Professional.
246. **Thompson, T.L., Peart, R.M., Foster, G.H., 1968.** Mathematical Simulation of Corn Drying — A New Model. in: *Transactions of the ASABE*, 11-(4): 0582-0586.
247. **Togrul, I., Pehlivan, D., 2004.** Modeling of thin-layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. *Journal of Food Engineering*, 65, 413–25 <http://dx.doi.org/10.2134/agronj1949.00021962004100090006x> .
248. **Toğrul, İ.T., Pehlivan, D., 2002.** Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering*, 55(3), 209-216.
249. **Toğrul, İ.T., Pehlivan, D., 2004.** Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. *Journal of Food Engineering*, 65(3), 413-425.
250. **Toor, R.K. and Savage, G.P., 2006.** Changes in Major Antioxidant Components of Tomatoes during Post-Harvest Storage. *Food Chemistry*, 99, 724- 727.
251. **Touati, N.; Barba, F.J.; Louaileche, H.; Frigola, A.; Esteve, M.J.** Effect of storage time and temperature on the quality of fruit nectars: Determination of nutritional loss indicators. *J. Food Qual.* 2016, 39, 209–217. [CrossRef]
252. **Tunde-Akintunde, T.Y. 2011.** Mathematical modeling of sun and solar drying of chilli pepper. *Renewable Energy*, 36(8), 2139-2145.
253. **Turkmen, N., Sari, F., Velioglu, Y.S., 2006.** Effects of extraction solvents on concentration and antioxidant activity of black and black mate tea polyphenols determined by ferrous tartrate and Folin–Ciocalteu methods .*Food Chemistry* 99(4):835- 841.
254. **Vagenas, G.K., Marinos-kouris, D.,1991.** The Design and Optimization of an Industrial Dryer for Sultana Raisins. *Drying Technology*, 9, 439-461.
255. **VASSEUR, J. 2009.** Séchage : principes et calcul d'appareils-Séchage convectif par air chaud (partie 1).
256. **Vega-Gálvez, A.; Ah-Hen, K.; Chacana, M.; Vergara, J.; Martínez-Monzó, J.; García-**

- Segovia, P.; Lemus-Mondaca, R.; Di Scala, K. 2012.** Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, colour, texture and microstructure of apple (var. Granny Smith) slices. *Food Chem.*, 132, 51-59.
257. **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(1), 296- 301.
258. **Wang, C. Y., Singh, R. P. 1978.** Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, 11, 668-672. <http://dx.doi.org/10.1080/07373930600626693> .
259. **Wang, G., He, Q.y., Zhao, H., Cai,Z.x,Guo,N., Zong.,Han, S.F., Liu, F., Jin w. 2019.** ChIP-cloning analysis uncovers centromere-specific retrotransposons in Brassica nigra and reveals their rapid diversification in Brassica allotetraploids *Chromosoma*, 128 pp. 119-131.
260. **Wang, H.-c., Zhang M., et al. 2015.** "Drying of shiitake mushroom by combining freeze-drying and mid-infrared radiation." *Food and Bioproducts Processing* 94(0): 507-517.
261. **Wang, J., Xi, Y.S., 2005.** Drying characteristics and drying quality of carrot using a two-stage microwave process. *Journal of Food Engineering*, 68, 505–511.
262. **Wangensteen, H., Samuelsen, A. B., & Malterud, K. E., 2004.** Antioxidant activity in extracts from coriander. *Food chemistry*, 88(2), 293-297.
263. **Warning, A. D., J. M. R. Arquiza.,2015.** A multiphase porous medium transport model with distributed sublimation front to simulate vacuum freeze drying." *Food and Bioproducts Processing* 94(0) : 637-648.
264. **Westerman, P. W., white, G. M., Ross, I. J. 1973.** Relative Humidity Effect on the High Temperature Drying of Shelled Corn. *Trans. ASAE*. University of Kentucky, America <http://dx.doi.org/10.13031/2013.37715>.
265. **White, G.M., Bridges, T.C., Loewer, O.J., Ross, I.J. 1980.** Seed Coat Damage in Thin-Layer Drying of Soybeans. *Transactions of the ASAE*, 23(1), 224-227.
266. **Williams, L. A. D., O'connar, A., Latore, L., Dennis, O., Ringer, S., Whittaker, J. A., Kraus, W., 2008.** The in vitro anti-denaturation effects induced by natural product. and non-steroidal compounds in heat treated (immunogenic) bovine serum albumin is proposed as a screening assay for the detection of anti-inflammatory compounds, without the use of animals, in the early stages of the

- drug discovery process. West Indian Medical Journal, 57(4) :327-331.
267. **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.
268. **Yahyaoui, N. 2005.** Extraction, analyse et évaluation de l'effet insecticide des huiles essentielles de Menthe Spicata L sur *Rhyzoperludominicu* (F.) (Coleoptera, Bostrychidae) et *Tribolium confusum* (Duv.) (Coleoptera, Tenebrionidae). Thèse de Magister. Option : Ecologie. INA, El-Harrach.
269. **Zeković, Z., Pavlič, B., Cvetanović, A., Đurović, S., 2016.** Supercritical fluid extraction of coriander seeds: Process optimization, chemical profile and antioxidant activity of lipid extracts. Industrial crops and products, 94, 353-362.
270. **Zhang, M., Tang, J., Mujumdar, A.S. and Wang, S., 2006.** Trends in microwave- related drying of fruits and vegetables. Trends in Food Science and Technology ,17(10)
271. **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.
272. **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 datte, Université El Hadj Lakhdar.
273. **Zoary H., 2000.**Phytoremediation. Annu. Rev.Plant Physio. 49, 43-66

Résumé

Le séchage, étape cruciale dans l'industrie agroalimentaire, repose souvent sur l'utilisation de l'énergie thermique. Cependant, ces méthodes peuvent induire des altérations structurelles des produits. Par conséquent, de nouvelles techniques permettant de préserver la qualité sont activement recherchées. L'application des ultrasons en tant que prétraitement avant le séchage représente une approche prometteuse pour améliorer les transferts de chaleur et de masse. Cette étude vise à évaluer l'impact de cette technique innovante sur le comportement de séchage de la coriandre et sur ses propriétés qualitatives. La première partie est axée sur l'optimisation de l'extraction des composés phénoliques totaux à partir de feuilles de coriandre, à l'aide d'une méthode de surface de réponse avec extraction assistée par micro-ondes, permettant d'obtenir un rendement élevé en antioxydants dans des conditions spécifiques. La deuxième partie se concentre sur la comparaison de différentes méthodes de séchage appliquées à la coriandre, avec pour objectif d'évaluer l'impact de ces méthodes sur la qualité nutritionnelle et organoleptique du produit final. Des cinétiques de séchage ont été réalisées en fonction de la perte de masse de la plante, ainsi que des modélisations et de l'évaluation de la composition phytochimique et de l'activité antioxydante de la poudre obtenue par les deux méthodes de séchage. L'analyse physico-chimique des poudres a été effectuée. Les résultats montrent que le temps de séchage obtenu par micro-ondes est significativement inférieur à celui du séchage conventionnel (étuve). Le séchage par micro-ondes a donné des teneurs élevées en composés phénoliques totaux (PPT) avec une valeur de 30,41 mg EAG/g MS, contre 26,22 mg EAG/g MS pour le séchage conventionnel, ainsi qu'une meilleure activité antioxydante avec un pourcentage de 87%. Le séchage par micro-ondes préserve donc mieux les composés phénoliques par rapport à l'étuve et engendre une meilleure activité antioxydante. Dans la troisième partie, nous avons exploré une combinaison innovante : le prétraitement par ultrasons couplé au séchage par micro-ondes. Cette approche s'est révélée encore plus efficace pour améliorer les propriétés de la coriandre séchée. Les ultrasons, en créant des microbulles dans le produit, facilitent la pénétration de l'énergie des micro-ondes, accélérant ainsi le processus de séchage. L'augmentation du niveau de micro-ondes et du temps d'échographie a permis de réduire le temps de séchage total jusqu'à 29,5%. De plus, cette méthode a permis de préserver une teneur plus élevée en composés phénoliques par rapport aux autres méthodes testées. Enfin, l'étude a examiné l'huile essentielle extraite des graines de coriandre séchée. Les résultats ont montré que cette huile essentielle possède de puissantes propriétés antioxydantes, antimicrobiennes et anti-inflammatoires, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour son utilisation dans divers domaines, tels que la pharmacie, la cosmétique et l'agroalimentaire. Il est essentiel de choisir une méthode de séchage adaptée pour préserver les qualités nutritionnelles et fonctionnelles des plantes aromatiques. Le séchage par micro-ondes et, plus encore, la combinaison ultrasons-micro-ondes apparaissent comme des alternatives prometteuses au séchage conventionnel. Ces techniques permettent non seulement de réduire les temps de séchage, mais aussi d'obtenir des produits finis de meilleure qualité, riches en composés bioactifs.

Mots clés : US-MW, MSR, modèle mathématique, *Coriandrum sativum* L, polyphénols, huile essentielle, activité antimicrobienne, anti-inflammatoire.

Abstract

Drying, a crucial step in the food industry, often relies on the use of thermal energy. However, these methods can induce structural alterations in products. Consequently, new techniques that preserve quality are actively being sought. The application of ultrasound as a pre-treatment before drying represents a promising approach to improve heat and mass transfer. This study aims to evaluate the impact of this innovative technique on the drying behavior of coriander and its qualitative properties. The first part focuses on optimizing the extraction of total phenolic compounds from coriander leaves using a response surface methodology with microwave-assisted extraction, allowing for high yields of antioxidants under specific conditions. The second part concentrates on comparing different drying methods applied to coriander, with the aim of evaluating the impact of these methods on the nutritional and organoleptic quality of the final product. Drying kinetics were carried out based on the plant's mass loss, as well as modeling and evaluation of the phytochemical composition and antioxidant activity of the powder obtained by the two drying methods. The physicochemical analysis of the powders was performed. The results show that the drying time obtained by microwave is significantly lower than that of conventional drying (oven). Microwave drying yielded high levels of total phenolic compounds (TPC) with a value of 30.41 mg EAG/g DW, compared to 26.22 mg EAG/g DW for conventional drying, as well as better antioxidant activity with a percentage of 87%. Microwave drying therefore better preserves phenolic compounds compared to the oven and results in better antioxidant activity. In the third part, we explored an innovative combination: pre-treatment with ultrasound coupled with microwave drying. This approach proved even more effective in improving the properties of dried coriander. Ultrasound, by creating microbubbles in the product, facilitates the penetration of microwave energy, thus accelerating the drying process. Increasing the microwave level and sonication time reduced the total drying time by up to 29.5%. Moreover, this method allowed for a higher content of phenolic compounds compared to the other methods tested. Finally, the study examined the essential oil extracted from dried coriander seeds. The results showed that this essential oil has potent antioxidant, antimicrobial, and anti-inflammatory properties, opening up new perspectives for its use in various fields, such as pharmaceuticals, cosmetics, and food. It is essential to choose a suitable drying method to preserve the nutritional and functional qualities of aromatic plants. Microwave drying, and even more so the combination of ultrasound and microwave, appear as promising alternatives to conventional drying. These techniques not only reduce drying times but also yield higher quality finished products, rich in bioactive compounds.

Keywords: US-MW, MSR, mathematical model, *Coriandrum sativum* L, polyphenols, essential oil, antimicrobial activity, anti-inflammatory.

ملخص

التجفيف، وهي مرحلة حاسمة في الصناعة الغذائية، تعتمد غالباً على استخدام الطاقة الحرارية. ومع ذلك، قد تؤدي هذه الطرق إلى حدوث تغييرات هيكلية في المنتجات. وبالتالي، يتم البحث بنشاط عن تقنيات جديدة للحفاظ على الجودة. يمثل تطبيق الموجات فوق الصوتية كعمالة مسبقة قبل التجفيف نهجاً واعداً لتحسين نقل الحرارة والكتلة. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير هذه التقنية المبتكرة على سلوك تجفيف الكزبرة وخصائصها النوعية. يركز الجزء الأول على تحسين استخلاص المركبات الفينولية الكلية من أوراق الكزبرة، باستخدام طريقة سطح الاستجابة مع الاستخلاص بمساعدة الميكروويف، مما يسمح بالحصول على عائد مرتفع من المواد المضادة للاكسدة في ظروف محددة. يركز الجزء الثاني على مقارنة طرق التجفيف المختلفة المطبقة على الكزبرة، بهدف تقييم تأثير هذه الطرق على القيمة الغذائية والحسية للمنتج النهائي. تم إجراء حركيات التجفيف بناءً على فقدان كتلة النبات، بالإضافة إلى النمذجة وتقييم التركيب الكيميائي النباتي والنشاط المضاد للاكسدة للمسحوق الناتج عن طريقتي التجفيف. تم إجراء التحليل الفيزيائي والكيميائي للمساحيق. تُظهر النتائج أن وقت التجفيف الذي تم الحصول عليه باستخدام الميكروويف أقل بكثير من وقت التجفيف التقليدي (الفرن). أدى التجفيف بالميكروويف إلى الحصول على مستويات عالية من للتجفيف التقليدي، بالإضافة إلى نشاط المركبات الفينولية الكلية 87٪. لذلك، يحافظ التجفيف بالميكروويف على المركبات الفينولية بشكل أفضل مقارنة بالفرن ويؤدي إلى نشاط مضاد (PPT) بقيمة 30.41 ملغ EAG / جم MS، مقارنة بـ 26.22 ملغ EAG / جم MS مضاد للاكسدة أفضل بنسبة 87٪. في الجزء الثالث، قمنا باستكشاف مزيج مبتكر: المعالجة المسبقة بالموجات فوق الصوتية مقترنة بالتجفيف بالميكروويف. أثبت هذا النهج أنه أكثر فعالية في تحسين خصائص الكزبرة المجففة. تعمل الموجات فوق الصوتية، من خلال إنشاء فقاعات دقيقة في المنتج، على تسهيل اختراق طاقة الميكروويف، مما يسرع عملية التجفيف. أدى زيادة مستوى الميكروويف ووقت الموجات فوق الصوتية إلى تقليل إجمالي وقت التجفيف بنسبة تصل إلى 29.5٪. علاوة على ذلك، سمحت هذه الطريقة بالحفاظ على محتوى أعلى من المركبات الفينولية مقارنة بالطرق الأخرى التي تم اختبارها. أخيراً، تم فحص الزيت العطري المستخلص من بذور الكزبرة المجففة. أظهرت النتائج أن هذا الزيت العطري يتمتع بخصائص مضادة للاكسدة ومضادة للميكروبات ومضادة للالتهابات قوية، مما يفتح آفاقاً جديدة لاستخدامه في مجالات مختلفة، مثل الصيدلة والتجميل والأغذية. من الضروري اختيار طريقة تجفيف مناسبة للحفاظ على الصفات الغذائية والوظيفية للنباتات العطرية. يظهر التجفيف بالميكروويف، وخاصة الجمع بين الموجات فوق الصوتية والميكروويف، كبدائل واعداً للتجفيف التقليدي. تسمح هذه التقنيات ليس فقط بتقليل أوقات التجفيف، ولكن أيضاً بالحصول على منتجات نهائية ذات جودة أعلى وغنية بالمركبات الحيوية

الكلمات المفتاحية: الموجات فوق الصوتية - الميكروويف، النموذج الرياضي، الكزبرة، البوليفينولات الزيت العطري، النشاط المضاد للميكروبات مضاد للالتهابات