

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 des Sciences Alimentaires
Spécialité Qualité des produits et sécurité alimentaire



Réf :.....

Mémoire de Fin de Cycle
En vue de l'obtention du diplôme

MASTER

Thème

**Suivi de la cinétique de séchage de la carotte
au microonde et à l'étuve**

Présenté par :

LEFSIHANE Yasmina & MORAD Meroa

Soutenu le : **29/06/2019**

Devant le jury composé de :

M. MOKRANI A/Rahmane	MCB	Président
M. MADANI Khodir	Professeur	Encadreur
Mme. OUCHEMOUKH Nadia	MCA	Examineur
Mlle. MOUHOUBI Khokha	Doctorante	Co encadreur

Année universitaire : 2018 / 2019

REMERCIEMENTS

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

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

Monsieur MADANI Khodir qui nous a honoré d'être notre promoteur et de nous avoir accordé l'opportunité de travailler dans le laboratoire 3BS Nous sommes très reconnaissantes pour sa grande contribution.

Monsieur MOKRANI A/Rahmane pour l'honneur qu'il nous a fait en président notre jury.

Madame OUCHEMOUKH Nadia d'avoir accepté d'examiner cette étude.

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

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



DÉDICACES

*A ceux qui m'ont tout donné sans rien en retour
A ceux qui m'ont encouragé et soutenu dans les moments les
plus difficiles*

Et ceux à qui je dois tant

A mes chers parents pour leur amour, soutien et patience.

Je les remercie d'autant que je ne remercie personne

*J'espère qu'un jour mon bon Dieu me donne l'occasion de les
honorer et rendre ce qu'ils méritent.*

A mes frères Samir, Fares , Yanis , Smail

A ma belle sœur Zwina

A mes sœurs Kahina , Sabrina , Safia

A toute ma famille oncles, tantes, cousins et cousines

*A mes voisines Tata saliha , Nassima et yasmine que je les
considère comme une deuxième famille*

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

A ma binome Meroa et sa famille.

A mes amis Souhila, Kenza, Meryem, Hayatte et Lilia

A toute la promotion ; sciences alimentaires.



Yasmina

DÉDICACES

*A ceux qui m'ont tout donné sans rien en retour
A ceux qui m'ont encouragé et soutenu dans les moments les
plus difficiles
Et ceux à qui je dois tant
A mes chers parents pour leur amour, soutien et patience.
Je les remercie d'autant que je ne remercie personne
J'espère qu'un jour mon bon Dieu me donne l'occasion de les
honorer et rendre ce qu'ils méritent.
A la mémoire de ma chère grand-mère que je garde dans mon
cœur
A ma sœur Sara.
A mon frère Ayoub
A toute ma famille oncles, tantes (Farida , Nora, Fouzia et
Nadira)
A mes cousines Lydia, Cerine, Amira, Yasmine
A mes proches
A ceux qui m'ont soutenu de loin et de près
A ma binome Yasmina et sa famille.
A mes amis (Souhila , Kenza , Lilia, Hayatte , Meryem, Imene,
et Zohra)
A toute la promotion ; sciences alimentaires.*



Meroa

Table des matières

Liste des abréviations	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Introduction	1
Synthèse bibliographique	
Chapitre I: Généralités sur la carotte	
I. Historique.....	3
II. Origine	3
III. Description botanique et taxonomie.....	3
III.1. Description botanique.....	3
III.2. Taxonomie	4
IV. Variétés de la carotte.....	4
V. Production régionale, nationale et mondiale	5
V.1. Production régionale.....	5
V.2. Production nationale	5
V.3. Production mondiale.....	5
VII. Différents antioxydants de la carotte	6
VII.1. Polyphénols.....	6
VII.2. Caroténoïdes.....	7
Chapitre II: Généralités sur le séchage	
I. Introduction sur le séchage	8
II. Définition.....	8
III. Objectif.....	8
IV. Principe	9
V. Phénomènes impliqués durant le procédé de séchage.....	9
VI. Méthodes de séchage	9
VI.1. Séchage par l'étuve (conventionnel)	9
VI.1.1. Définition.....	9
VI.1.2. Principe	10
VI.1.3. Inconvénients.....	10
VI.2. Séchage par microonde	10
VI.2.1. Définition.....	10

VI.2.2. Principe	10
VI.2.3. Avantages	11
VII. Cinétique de séchage	11
VIII. Modélisation de la cinétique séchage	11

Partie pratique
Matériel et méthodes

I. Matériel et méthodes	12
I.1. Collecte des échantillons	12
I.2. Cinétique de séchage	12
I.2.1. Séchage aux micro-ondes et à l'étuve	12
I.2.2. Modélisation	12
I.2.3. Broyage	12
I.3. Evaluation de la qualité des poudres séchées	13
I.3.1. Détermination de taux de l'humidité	13
I.3.2. Qualité physique	13
I.3.2.1. Rétrécissement	13
I.3.2.2. Densité apparente	13
I.3.3. Qualité phytochimique	14
I.3.3.2. Dosage des polyphénols totaux	14
I.3.3.3. Activité antioxydante des polyphénols totaux	15
I.3.3.2. Dosage des caroténoïdes	16
II. Analyse statistique	16

Résultats et discussion

I. Teneur en humidité de la carotte fraîche	17
II. Cinétique de séchage	17
II.1. Cinétique de séchage par micro-onde	17
II.2. Cinétique de séchage par étuve	19
II.3. Etude comparative du séchage par microonde et à l'étuve de la carotte	20
IV. Evaluation de la qualité des poudres séchées	22
IV.1. Teneurs en humidité des poudres séchées	22
IV.2. Qualité physiques	24
IV.2.1. Rétrécissement	24
IV.2.2. Densité	26
IV.3. Qualité phytochimique	26

IV.3.1. Teneur en polyphénols totaux.....	26
IV.3.1.1. Teneur en polyphénols totaux poudres de carottes séchées au microonde.....	28
IV.3.1.2. Teneur en polyphénols totaux des poudres de carottes séchées à l'étuve	30
IV.3.1.3. Comparaison entre les deux procédés de séchage en termes de teneur en PPT .	30
IV.3.2. Détermination de l'activité antioxydante des polyphénols totaux.....	31
IV.3.2.1. Activité scavenger sur le radical 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle (DPPH).....	31
IV.3.2.1.1. Activité anti-oxydante des extraits de la carotte séchée au micro-onde.....	31
IV.3.2.1.2. Activité anti-oxydante des extraits de la carotte séchée à l'étuve	32
IV.3.2.1.3. comparaison entre les deux procédés de séchage en termes de pourcentage d'inhibition du DPPH	34
IV.3.2.2. Activité anti-oxydante par le test ABTs	34
IV.3.2.2.1. Activité anti-oxydante des poudres de la carotte séchées au micro-onde.....	34
IV.3.2.2.2. Activité anti-oxydante des poudres de carotte séchées à l'étuve.....	35
IV.3.2.2.3. Comparaison entre les deux procédés de séchage en termes de pourcentage d'inhibition de l'ABTs	36
IV.3.3. Teneur en caroténoïdes	36
IV.3.3.1. Teneur en caroténoïdes des poudres de carotte séchées par microonde	36
IV.3.3.2. Teneur en caroténoïdes des poudres de carottes séchées par l'étuve	37
IV.3.3.3. Comparaison entre les deux procédés de séchage en terme de teneur en caroténoïdes	38
Conclusion.....	40
Références bibliographiques.....	42
Annexes	

Liste des abréviations

DSA : Direction des Services Agricoles

INRA : Institut National de la recherche agronomique

PPT : Polyphénols totaux

DPPH : 1,1-diphenyl-2-picryl-hydrazile

ABTs : Acide 2 ,2'azinobis-3-ethylbenthiazoline-6-silfonic

EAG : Equivalent acide gallique

EβC : Equivalent bêta carotène

MS : Matières sèches

TH : Teneur en humidité

R² : Coefficient de détermination

MO : Microonde

AFNOR : Associations françaises de normalisation

Liste des tableaux

Tableau I: Classification de la carotte	4
Tableau II : Récapitulatif de la production régionale	5
Tableau III : Récapitulatif des superficies, des productions, des rendements et le taux d'accroissement national de l'année 2014/2015	5
Tableau IV : Composition et valeur nutritive de la carotte..	6
Tableau V : Temps et vitesses moyennes de séchage de la carotte aux microondes et à l'étuve.....	20
Tableau VI : Modélisation de la cinétique de séchage par microonde	21
Tableau VII: Modélisation de la cinétique de séchage par étuve	22
Tableau VIII : Résultats de l'analyse statistique des teneurs en humidité.	24
Tableau IX : Résultats de l'évaluation des paramètres physiques.....	25
Tableau X : Résultats de l'analyse statistique des polyphénols totaux.	31
Tableau XI: Résultats de l'analyse statistique des caroténoïdes.....	39

Liste des figures

Figure 1 : Photographie de différentes variété de la carotte .	4
Figure 2 : photographie des poudres de carotte séchées par microonde(A) et par l'étuve (B)	13
Figure 3 : Teneur en humidité de la carotte fraîche.	17
Figure 4 : Variation de la perte en masse (%) à différentes puissances de micro-onde.	18
Figure 5 : Variation de la perte en masse (%) à différentes température de l'étuve.	19
Figure 6 : Teneur en humidité des poudres séchées par micro-onde.	23
Figure 7 : Teneur en humidité des poudres sèche par étuve.	23
Figure 8 : Photographie d'une rondelle de carotte avant et après séchage.	25
Figure 9 : Résultat de l'étude de l'influence du type de solvant sur le rendement de PPT.	27
Figure 10 : Résultat de l'étude de l'influence de la concentration du solvant sur le rendement en PPT.	28
Figure 11: Teneurs en polyphénols totaux des poudres de carotte séchée par micro-onde.	29
Figure 12 : Teneurs en polyphénols totaux des poudres de carotte séchée par étuve.	30
Figure 13 : Pourcentage d'inhibition du radical DPPH par les extraits phénoliques des poudres de carotte séchées par microonde.	32
Figure 14 : Pourcentage d'inhibition du radical DPPH par les extraits phénoliques des poudres de carotte séchée par l'étuve.	33
Figure 15 : Pourcentage d'inhibition du radical ABTs par les extraits phénoliques des poudres de carotte séchée par microonde.	34
Figure 16 : Pourcentage d'inhibition du radical ABTS par les extraits phénoliques des poudres de carotte séchée par l'étuve.	35
Figure 17 : Teneur en caroténoïdes totaux des poudres de la carotte issues de séchage par	37
Figure 18 : Teneur en caroténoïdes des poudres de la carotte issues de séchage par l'étuve.	38

Introduction générale

Introduction

Les fruits et légumes sont une composante importante d'une alimentation saine et, consommés quotidiennement en quantité suffisante, ils pourraient aider à prévenir des affections d'importance majeure, comme les maladies cardiovasculaires et certains cancers. **(mondiale de la Santé 2014).**

La carotte (*Daucus carota* L.) est l'un des légumes dont la consommation, tant fraîche que transformée, a augmenté ces dernières années, non seulement en raison de sa valeur nutritive élevée, car elle contient du complexe de vitamine B et divers minéraux, mais aussi en raison de ses bienfaits pour la santé, en raison de ses propriétés antioxydantes et activités anticancéreuses des carotènes **(Alasalvar, Grigor et al. 2001; Suvarnakuta, Devahastin et al. 2005; Arikan, Ayhan et al. 2011)**. Ce légume a une humidité naturelle d'environ 90%. Cette teneur le rend périssable, à cet effet, différentes techniques ont été utilisées pour sécher la carotte afin de conserver son apparence naturelle et ses valeurs nutritionnelles **(Zhao, An et al. 2014)**.

Le séchage a été l'un des processus les plus communément utilisés pour améliorer la stabilité des aliments, par la diminution de l'activité de l'eau du produit, la réduction de l'activité microbologique, et la minimisation des changements physiques et chimiques intervenant pendant le stockage **(Mayor and Sereno 2004)**. Parmi les méthodes utilisées pour le séchage : le séchage conventionnel qui comprend une exposition des produits alimentaires à haute température et pour de longues périodes, ce qui peut entraîner de graves dommages à la saveur, la couleur, la capacité de réhydratation et des éléments nutritifs de la matière traitée, ainsi que sur la valeur énergétique **(Drouzas, Tsami et al. 1999; Sharma and Prasad 2006; Dadalı, Kılıç Apar et al. 2007)**.

À cet effet, le développement de nouvelles méthodes de séchage essentielles pour la conservation des produits alimentaires qui peuvent gagner du temps, de l'énergie et de minimiser la dégradation de la qualité. Ces dernières années, le séchage par micro-ondes a gagné une popularité en tant qu'une méthode de séchage alternative pour surmonter les effets indésirables pour une grande variété des produits alimentaires **(Bouraoui, Richard et al. 1994; Tulasidas, Raghavan et al. 2007)**; en présentant plusieurs avantages par rapport à un séchage classique, comme un taux de séchage plus élevé, un chauffage minimal aux endroits où il y a moins d'eau, réduisant ainsi la surchauffe des endroits où le chauffage est inutile.

Cependant, le séchage peut provoquer des modifications de la structure physique rétrécissement et densité ; c'est le cas rapporté par **Amami, Khezami et al. (2017)**, **Katekawa and Silva (2007)**, **Alireza, Mehdi et al. (2005)**.

Le rétrécissement provoque des contraintes dans la structure cellulaire de l'aliment, entraînant un changement de forme et une diminution de ses dimensions, ce qui nuit à la qualité du produit déshydraté (**Al-Muhtaseb, McMinn et al. 2004**). La densité est une autre propriété physique importante caractérisant la texture et la qualité des aliments secs et moyennement humides (**Marousis and Saravacos 1990**).

Il peut également affecter la qualité phytochimiques (les composés phénoliques et les caroténoïdes). Par ailleurs, Plusieurs études antérieures étudiant l'effet du séchage sur la qualité chimique ont été réalisées à travers le monde (**Turhan, Turhan et al. 1997**; **Galgali, Ramesh et al. 2001**; **Doymaz and Pala 2002**).

Le présent travail, consiste à étudier le processus de séchage assisté par Micro-onde et par étuve ventilée de la carotte dans le but de contribuer à la compréhension du séchage des légumes-racinaires. Ce mémoire est donc structuré en deux principales parties dont :

La première est consacrée à un bref rappel bibliographique sur les recherches effectuées sur la carotte (son origine, sa description botanique et sa classification ainsi que sa production régionale, nationale et mondiale...). En outre, dans cette partie, nous avons évoqué également la notion du séchage (sa définition, son objectif et principe ,ainsi que les deux techniques de séchage par microonde et étuve et leurs cinétiques et modélisation..).

La deuxième partie traite :

- l'étude des cinétiques de séchage des tranches de carotte, et leur évolution au cours du temps aux différentes températures de l'étuve (60, 80 et 100 °C) et aux différentes puissances du micro-onde (100, 500 et 1000 W) ;
- la modélisation des cinétiques de séchage en utilisant quatre modèles ;
- l'étude de la qualité physique des poudres récupérées après le procédé du séchage (à l'étuve et au microonde) par évaluation des deux paramètres ; rétrécissement et densité ;
- l'étude de leur qualité phytochimique par la détermination de la teneur en composés phénoliques et l'évaluation de leurs activités antioxydantes et la détermination de la teneur en caroténoïdes.

Synthèse bibliographique

CHAPITRE I: Généralités sur la carotte

Généralité sur la carotte

I. Historique

La carotte est l'une des plus importantes plantes de légumes-racines au monde. Dans son état sauvage, c'est une minuscule, racine amère peu attrayante comme aliment, mais des années de culture et de domestication humaine, en a fait un légume extrêmement polyvalent, apparaissant dans plusieurs couleurs, formes et tailles. Bien que cultivé depuis plus de 2000 ans et utilisé à l'origine uniquement comme plante médicinale (**Carrot 2011**).

II. Origine

Il y a près de cinq mille ans, les carottes ont été cultivées pour la première fois sur le plateau iranien (Afghanistan, Pakistan et Iran), puis dans l'empire persan. (**Brothwell and Brothwell 1998**) La couleur et l'arôme étaient les principaux critères de sélection pour la domestication. La couleur de la racine a changé de manière significative au cours de la période de domestication. La carotte sauvage est blanche ou jaune pâle, tandis que le violet ou le jaune étaient les premières couleurs des domestiques. Les types domestiqués ont été divisés en deux sous-groupes: le groupe oriental / asiatique (*var. Altorubens*) et le groupe occidental (*var. Sativus*) comme décrit par (**Carrot 2011**).

III. Description botanique et taxonomie

III.1. Description botanique

La carotte est une plante herbacée qui peut atteindre 30 centimètres de long, à racine pivotante, orange, épaisse et allongée. Les feuilles sont profondément divisées et couvertes de poils. Les fleurs blanches, de petite taille, sont regroupées en ombelles composées, inflorescence caractéristique de la famille. Ces ombelles ont de 30 à 40 rayons, généralement incurvés vers le sommet. La fleur centrale, relativement plus grande, est rouge pourpre, ce qui distingue les ombelles de carottes au premier coup d'œil. Les fleurs extérieures ont des pétales inégaux, ceux situés vers l'extérieur étant relativement plus grands pour attirer les insectes pollinisateurs. La floraison a lieu de mai à octobre (**Nguyen 2015**).



Figure 1 : Photographie de différentes variétés de la carotte (Carrot 2011).

III.2. Taxonomie

La carotte (*Daucus carota* L.) est une plante bisannuelle de climats tempérés, appartenant à la famille des Apiacées. Anciennement appelée famille des Ombellifères. Cette vaste et complexe famille comprend environ 445 genres et 3 700 espèces (Downie and Katz-Downie 1996). Les relations phylogénétiques établies anciennement sur la base de donnée morpho-anatomiques ont été plusieurs fois remaniées grâce à l'utilisation de nouveaux types de données issues de la biologie moléculaire (Lecomte 2013).

Tableau I: Classification de la carotte (Spooner, Rojas et al. 2013).

Règne	Plantae
Division	<i>Magnoliophyta</i>
Classe	<i>Magnoliopsida</i>
Ordre	<i>Apiales</i>
Famille	<i>Apiaceae</i>
Genre	<i>Daucus</i>
Espèce	<i>Daucus carota</i> L

IV. Variétés de la carotte

Les principales variétés de la carotte en Algérie sont : Super muscade, Muscade, Touchons - Nantaise améliorée.

La carotte muscade d'Algérie est peut être la meilleure variété pour sa saveur, c'est une semence qui a l'avantage d'être prête à l'arrachage 15 jours plus tôt que toute autre variété semée le même jour. Sa racine est d'autant plus appréciée qu'elle a le cœur moins volumineux. Les variétés à racine rouge sont les plus appréciées, celles à racine jaune sont moins estimées. Les variétés à racine blanche sont destinées à l'alimentation du bétail (Ayas, Messaoudi et al. 2017).

V. Production régionale, nationale et mondiale

V.1. Production régionale

La production régionale se concentre dans la région d'Akbou à plus de quarante mille Quintaux par hectares.

Tableau II : Récapitulatif de la production régionale (DSA, 2015).

Communes	Tamokra	Akbou	Tazmalt	Aitrezine	Beni-ksila	Ouzel-aguen	Bouhamza	Total Des explorations
Sup(ha)	1.00	2.00	2.00	1.00	4.00	1.00	1.00	12
Prod(hx)	150.00	430.00	300.00	60.00	60.00	290.00	50.00	1340

V.2. Production nationale

Très répandue dans les régions du littoral (Alger, Boumerdes, Mostaganem), les hauts plateaux (M'sila, Oum el bouaghi, Sétif) et le sud (Adrar, Biskra, Ghardaïa, El oued) ;

Tableau 2.

Le tableau indique qu'il y a 5 zones agro-écologiques de production de la carotte en Algérie. On constate que la production se concentre sur les hautes plaines du centre et de l'Est, le littoral centre et l'Est ; ces dernières ont la même période de fin de plantation (28/02), la durée du même cycle de culture (65-90 jours) et sont récoltées à la même période (30/07).

Tableau III : Récapitulatif des superficies, des productions, des rendements et le taux d'accroissement national de l'année 2014/2015 (INRA, 2015)

Année/Sup (ha)	2014	2015	2014/2015
Prod (qx)	18042	18649	3
Rdt (qx/ha)	3868139	3915631	1
Sup (qx)	214.4	210.00	-1

V.3. Production mondiale

La carotte est cultivée pratiquement partout dans le monde, et elle fait partie des légumes les plus consommés sur la planète. Aujourd'hui, on ne dénombre pas moins de 500 variétés de carottes dans le monde. Chaque seconde, ce sont plus de 1.12 kilo de carottes qui sont produits dans le monde (compteur). La production mondiale des quelque 500 variétés de carottes est donc d'environ 35,5 millions de tonnes par an (2014) dont près de la moitié en Chine .

VI. Composition chimique

Le tableau IV apporte une information sur la quantité moyenne, ainsi que les quantités minimum et maximum pour 100 g net de carottes crues.

Tableau IV : Composition et valeur nutritive de la carotte. (Souci, Scherz et al. 1994).

Composants (g)	Quantité	Min-Max
Eau	89.6	85.7-92.3
Protéines	0.77	0.5-1.3
Lipides	0.26	0.1-0.4
Acides gras saturés	0.054	0.037-0.079
Glucides	6.45	6.3-6.6
Sucre	5.42	4.74-6.1
Fibres	2.7	2.1-3.6
Vitamine (ug)		
Provitamine A(Béta-carotène)	8290	1999-21000

VII. Différents antioxydants de la carotte

Les antioxydants sont des composés chimiques qui réduisent ou neutralisent l'oxydation des cellules (**Zhang and Hamauzu 2004**). La richesse en antioxydants naturels (vitamine C, vitamine E, β - carotène et polyphénols) est l'indicateur de la qualité nutritionnelle et organoleptique des légumes (**Maiani, Periago Castón et al. 2009**).

En général, les fruits et légumes sont une source de composés phénoliques ; la carotte est riche en acides phénoliques (**Marinova, Ribarova et al. 2005**) .

Elle présente également une teneur relativement élevée en caroténoïdes, en particulier, en β carotène (**Sulaeman, Keeler et al. 2001**) ,et fournit environ 17 % de la vitamine A totale. Cette provitamine A, outre le fait qu'elle contribue à la couleur orange si typique, protège de troubles de la vision et maintient en bon état les tissus de l'organisme, notamment la peau et les bronches (**Northolt, van der Burgt et al. 2004**) .

VII.1. Polyphénols

- **Définition et structure**

Les composés phénoliques sont un groupe important de métabolites secondaires synthétisés durant un développement normal de la plante et lors de la réponse aux conditions de stress tels

que les infections, les blessures et l'exposition aux radiations UV. Ces composés sont très diversifiés et dérivent de la phénylalanine et de la tyrosine .(**Macheix, Fleuriet et al. 2005**).

La carotte contient 20 ug/100g des polyphénols totaux et d'acides phénoliques (**Rothwell, Perez-Jimenez et al. 2013**).

VII.2. Caroténoïdes

- **Définition**

Les caroténoïdes sont des pigments lipophiles ayant des propriétés anti oxydantes y compris d'autres activités(**Murkovic, Mülleder et al. 2002**) .Ces pigments appartiennent à la famille des tétraterpénoïdes (C40) formés de huit unités isoprènes liés et forment une molécule symétrique .

Les carottes contiennent des caroténoïdes, qui sont un groupe de pigments liposolubles caractérisés par une longue chaîne linéaire structure en polyène. Ces pigments absorbent la lumière dans le visible. Du spectre lumineux et sont responsables de les couleurs orange et jaune que l'on retrouve dans les fruits et légumes. Les caroténoïdes de la carotte sont des améliorateurs de santé, en particulier leur b-carotène et a-carotène, qui possèdent des propriétés antioxydants et sont convertis en vitamine A au cours du métabolisme (**Nahimana and Zhang 2011**).

CHAPITRE II: Généralités sur le séchage

I. Introduction sur le séchage

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

II. Définition

Le séchage est l'un des moyens couramment utilisé pour la préservation des aliments en général et des fruits et légumes en particuliers (**Li, Raghavan et al. 2011**).

Le séchage thermique, un procédé très courant et très diversifié, transforme les aliments solides, semi-solides ou liquides en un produit solide par le processus d'évaporation du liquide en phase vapeur (**Li 2004**).

III. Objectif

L'utilisation du séchage dans les industries agro-alimentaires a de multiples buts dont les principaux sont :

- Prolonger la durée de conservation des produits (viandes, poissons, fruits, graines, pâtes, épices, thé, champignons) (**Alibas 2007; Zhao, An et al. 2014**) ;
- Inhiber de l'activité des microorganismes, des enzymes ou des ferments de la matière (**Maskan 2001; Alibas 2007; Bozin, Mimica-Dukic et al. 2008**) ;
- Stabiliser les produits agricoles (maïs, riz, lait, tomate) et amortir le caractère saisonnier de certaines activités ;
- Diminuer la masse et le volume des aliments pour réduire leur encombrements et faciliter leurs emballages et transports (**Lewicki 1998**) ;
- Minimiser considérablement la détérioration microbienne et les réactions de détérioration (**Krokida, Karathanos et al. 2003**) ;

- Inhiber d'une part les enzymes responsables de la dégradation des polyphénols telles que, les polyphénoloxydases et d'autre part il empêche la prolifération bactérienne .(Sacilik 2007; Guiné, Henriques et al. 2012) ;
- Réduire l'espace de stockage et le poids de transport et possibilité de stocker le produit à température ambiante, avec des avantages économiques importants (Doymaz 2007; Sacilik 2007).

IV. Principe

Les transferts d'énergie et de masse ont lieu pendant le processus de séchage. Les premiers comprennent la conduction, la convection et le rayonnement, tandis que les seconds représentent l'élimination de l'humidité (Li 2004).

V. Phénomènes impliqués durant le procédé de séchage

L'opération de séchage fait intervenir deux phénomènes : un transfert de chaleur vers la matrice pour faciliter la vaporisation de l'eau, et un transfert de matière (fréquemment de l'eau liquide pour le transfert interne et de la vapeur d'eau pour le transfert externe) de la matrice vers l'atmosphère environnante (Ertekin and Yaldiz 2004).

VI. Méthodes de séchage

VI.1. Séchage par l'étuve (conventionnel)

VI.1.1. Définition

Dans cette méthode, l'air chauffé est mis en contact avec le matériel humide pour faciliter la chaleur et le transfert massif; la convection est principalement impliquée Il faut préciser la consigne de température de l'étuve, le temps de séjour, et la taille de l'échantillon à tester. Même si cette taille n'est pas en général critique, le temps de séjour dans l'étuve doit être adapté au rapport surface/volume (Dikbasan 2007).

L'humidité de l'air présente dans l'étuve peut être augmentée par la vapeur émise par les échantillons séchés, en fonction du renouvellement de l'atmosphère interne de l'étuve (rarement précisé), et en fonction des hétérogénéités de température dans l'étuve, (préférer les étuves« ventilées », à ventilation forcée).

VI.1.2. Principe

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

VI.1.3. Inconvénients

Le séchage à l'air chaud conventionnel présente l'inconvénient d'une faible efficacité énergétique et d'un temps de séchage long, ce qui nuit à la texture, à la couleur, à la saveur et à la valeur nutritive des produits en raison de la température élevée utilisée (**Arikan, Ayhan et al. 2012**).

VI.2. Séchage par microonde**VI.2.1. Définition**

Le séchage par microonde 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, sa longueur d'onde est comprise entre 1mm et 1 m, et sa fréquence varie de 300 Mhz à 300 Ghz, en utilisant comme énergie primaire, l'électricité. Dans le spectre, elles se situent dans les hyperfréquences ; entre les ondes radios (10^8 Hz) et l'infrarouge (10^{12} Hz) (**Kone 2011**).

VI.2.2. Principe

Pendant le séchage par micro-ondes, la chaleur est générée par transformation directe l'énergie électromagnétique en énergie moléculaire cinétique, la chaleur est ainsi générée à l'intérieur le matériau (**Changrue 2006**).

L'énergie des micro-ondes est capable de polariser des substances. Les électrons de la substance polarisée étaient en mouvement en raison de la conversion de l'énergie électromagnétique incorporée dans la substance en énergie cinétique. Les électrons se bousculent au cours de ce mouvement d'électrons et leur énergie est convertie en énergie thermique à la suite de frictions Ainsi, l'humidité a été éliminée du produit lors du séchage au micro-ondes (**Alibas 2007; Arikan, Ayhan et al. 2011**).

VI.2.3. Avantages

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

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

VII. Cinétique de séchage

Étant données les très grandes variabilités et diversité des produits alimentaires et biologiques, le meilleur moyen de caractériser le comportement au séchage d'un produit consiste à mesurer expérimentalement sa cinétique de séchage. Dans le cas d'un produit solide séché par entraînement, l'expérience de base consiste à placer le produit en question dans un courant d'air parfaitement maîtrisé (température, humidité, vitesse) et à enregistrer l'évolution de sa masse au cours du temps, par des pesées à intervalles de temps réguliers. D'autres techniques sont envisageables (analyse de l'humidité de l'air sortant notamment) (**BONAZZI and BIMBENET 2003**).

VIII. Modélisation des cinétiques de séchage

Le séchage est un processus thermique complexe dans lequel la chaleur instable et le transfert d'humidité se produisent simultanément. Pour des raisons d'ingénierie, il est important de mieux comprendre ce processus complexe et c'est pourquoi la modélisation mathématique joue un rôle essentiel (**Díaz, Giannuzzi et al. 2009; Ruiz-López, Castillo-Zamudio et al. 2010**). De nombreux modèles mathématiques ont été proposés pour décrire le processus de séchage, parmi lesquels des modèles de séchage en couche mince ont été largement utilisés. Ces modèles peuvent être regroupés en deux catégories: théorique, semi-théorique (**Guiné, Henriques et al. 2012**).

PARTIE PRATIQUE

Matériel et méthodes

I. Matériel et méthodes

I.1. Collecte des échantillons

La matrice utilisée dans cette présente étude est la carotte (*Daucus carota* L.), c'est une espèce très cultivée en Algérie, sa récolte se fait durant toute l'année, elles ont été achetée sur un marché local de wilaya de Béjaia .

I.2. Cinétique de séchage

I.2.1. Séchage aux micro-ondes et à l'étuve

Des échantillons des carottes (*Daucus carota* L.) ont été séchés par microonde à différentes puissances ; 100, 500 et à 1000 W et par étuve à différentes températures 60°C, 80°C et 100°C. Pour les deux types de procédés, la carotte a été bien lavée avec de l'eau de robinet suivi de l'eau distillée, découpée en fines tranches sous forme de rondelles d'épaisseur inférieur à 1cm ; puis des échantillons de 90g ont été étalés sur une assiette et des pesées périodiques à des intervalles de temps constants ont été effectuées. Les cinétiques de séchage ont été suivies régulièrement jusqu'à la masse constante. Les essais de séchage ont été réalisés en triple pour chaque température et chaque puissance.

- **Expression des résultats**

Pour calculer la perte en masse (PM) on utilise l'équation suivante :

$$PM(\%) = \frac{P_2}{P_1} \times 100$$

P_1 et P_2 : correspond à la perte de poids pendant le séchage.

I.2.2. Modélisation

La perte en masse a été modélisée par les quatre modèles suivant (Lewis, Henderson et Pabis, Logarithmique, Page) dont les équations de chaque modèles sont :

1. Lewis : $PM = \exp(-kt)$
2. Henderson et Pabis: $PM = a \cdot \exp(-kt)$
3. Logarithmique : $PM = a \cdot \exp(-kt) + c$
4. Page : $PM = \exp(-kt^n)$

I.2.3. Broyage

Les carottes séchées ont fait l'objet d'un broyage à l'aide d'un broyeur électrique afin d'obtenir des poudres de fines particules, qui sont par la suite conservées dans des flacons ombrés, pour les utilisations ultérieures.



Figure 2 : photographie des poudres de carotte séchées par microonde(A) et par l'étuve (B)

I.3. Evaluation de la qualité des poudres séchées

I.3.1. Détermination de taux de l'humidité

La méthode de séchage thermique a été utilisée pour déterminer la teneur en humidité de l'échantillon. 10 g d'échantillon ont été placés dans un four à 105 ° C pendant 3h. La teneur en humidité (TH) a été calculée en exprimant la perte de poids lors du séchage en fraction du poids initial de l'échantillon utilisé.(AFNOR).

$$\text{TH (\%)} = \frac{W_0}{W_i} \times 100$$

W_0 : correspond à la perte de poids (g) au séchage.

W_i : correspond au poids initial de l'échantillon (g).

I.3.2. Qualité physique

I.3.2.1. Rétrécissement

La détermination du rétrécissement en vrac de chaque carotte a été réalisée en utilisant un calibre à coulisse. Le retrait volumétrique (R) des carottes sphériques a été calculé en fonction de l'équation (Amami, Khezami et al. 2017) .

$$\text{R\%} = \left(\frac{V_f}{V_0} \right) \times 100$$

V_0 et V_f sont le volume de la carotte sphérique avant et après séchage, respectivement.

I.3.2.2. Densité apparente

La densité apparente des poudres de carotte obtenues à partir de différents procédés de séchage a été mesurée selon la procédure décrite par(Caparino, Tang et al. (2012)).Une prise d'essai de poudre de carotte ont été versés librement dans un cylindre gradué en verre de 25 ml (lisible à 1 ml). Les échantillons ont été saisis manuellement à plusieurs reprises en soulevant et en laissant tomber le cylindre sous son propre poids à une distance verticale de 14 ± 2 cm de hauteur jusqu'à ce qu'une différence de volume négligeable entre les mesures successives ait été observée. Étant donné la masse m et le volume apparent (tarauté) v de la

poudre, la densité apparente de la poudre a été calculée en m / v (g / cm^3). Les mesures ont été effectuées à la température ambiante en trois répétitions pour tous les échantillons.

I.3.3. Qualité phytochimique

I.3.3.1. Teneur en polyphénols totaux

✓ Etude préliminaire

Une étude préliminaire a été effectuée dans le but de sélectionner le meilleur solvant et sa meilleure concentration pour un meilleur rendement en composé phénolique. La méthodologie consiste à fixer tout les paramètres et à n'en faire varier qu'un, l'effet de chaque paramètre est évalué en déterminant la teneur en polyphénols totaux.

I.3.3.2. Extraction des polyphénols totaux

Les polyphénols ont été extraits en utilisant la méthode décrite **par (Zielinska, Zielinska et al. 2017)**. Brièvement, 0.05 g d'échantillon ont subi une sonification pendant 30 s (**Brasonic ,Ultrasonic cleaner, USA**) avec 1 ml de acétone à 70%. Le mélange a été vortexé pendant 30 s, traité aux ultrasons à plusieurs reprises, vortexé et centrifugé (**Zentaifugen D-78532 Tuttlingen, Eppendorf, Germany**) pendant 10 min (13 200 r). Cette étape a été répétée trois fois sur des résidus avec 1 ml supplémentaire de solvant. Les surnageants ont été recueillis dans un ballon de 3 mL et récupérés dans des flacons opaques et stockés à 4°C jusqu'à l'analyse. La procédure d'extraction a été réalisée en triple.

✓ Dosage des polyphénols totaux

• Principe

Optimisation Folin-Ciocalteu. Le réactif de Folin-Ciocalteu, mélange d'acides phosphotungstique (H₃PW₁₂O₄₀) et phosphomolybdique (H₃PMo₁₂O₄₀), est réduit en oxydes bleus de tungstène (W₈O₂₃) et de molybdène (Mo₈O₂₃) au cours de l'oxydation du phénol. Cette réaction se produisant dans des conditions alcalines est effectuée avec du carbonate de sodium. La coloration bleue est suivie à 760 nm et reflète la quantité de polyphénols généralement exprimée en équivalent acide gallique (EAG) ou en équivalent catéchine (**Georgé, Brat et al. 2005**) .

• Dosage

Le dosage des polyphénols totaux a été effectué selon le protocole de (**Georgé, Brat et al. 2005**):

- 2,5 ml de réactif de Folin-Ciocalteu dilué dans de l'eau (1/10) a été ajouté aux différents extraits

- Incubation pendant 2 min à la température ambiante
- Ajout de 2 ml de carbonate de sodium (75 gL⁻¹)
- Incubation pendant 15 min à 50°C
- Refroidissement dans un bain de glace à l'eau
- Lecture à 760nm

I.3.3.3. Activité antioxydante des polyphénols totaux

1. Activité scavenger sur le radical 2,2-diphényl-1-picrylhydrazole (DPPH)

- **Principe**

Le principe est basé sur la mesure de l'aptitude d'un antioxydant à neutraliser le radical libre DPPH (diphényle picryl-hydrayl), relativement stable à température ambiante et qui se colore en violet lorsqu'il est dissout dans l'éthanol ou le méthanol. En présence d'un antioxydant, le DPPH est réduit en DPPH-H.

- **Dosage**

La mise en évidence du pouvoir anti-radicalaire de l'extrait des poudres, via le test DPPH[•] est effectuée par la méthode **de (Achat, Tomao et al. 2012)** :

- Prendre 100 µl d'extrait de chaque poudre séchée à différentes puissances et températures ;
- Ajouter 900 µl DPPH.
- Incuber à l'obscurité 30 min.
- Lire les absorbances à 517 nm.

- **Expression des résultats**

Le pouvoir anti radicalaire de DPPH, est exprimé en pourcentage :

$$\text{Pourcentage d'inhibition du DPPH} = (\text{AC} - \text{AE}) / \text{AC} \times 100$$

AC : Absorbance du contrôle.

AE : Absorbance d'échantillon.

2. Activité antioxydante par le test ABTs

- **Principe**

A une température ambiante et en solution le cation radical ABTS^{•+} [l'acide 2,2'-azinobis-(3-ethyl-benzothiazoline-6-sulfonique)], présente une coloration bleuâtre due à la réaction entre l'ABTS et le persulfate de potassium. Son passage à la forme non radicalaire, après saturation de ses couches électroniques par un antioxydant s'accompagne d'une décoloration (**Re,**

Pellegrini et al. 1999). La décoloration d'ABTs•+ est mesurée par un spectrophotomètre est un résultat de sa réduction par des atomes d'hydrogène données par l'échantillon.

- **Dosage**

Un ml d'extrait dilué (dilution : 1/2) est additionner à 1 ml d'ABTs. Après incubation à l'obscurité et à 37 °C pendant 6 minutes, l'absorbance est mesurée à 734 nm. Les tests sont réalisés en triple(**Amensour, Sendra et al. 2010**).

- **Expression des résultats**

Le pourcentage d'inhibition du radical ABTs• est exprimé par la formule

$$\text{Pourcentage d'inhibition d'ABTs} = (A_0 - A_1) / A_0 \times 100$$

A0: absorbance du control à 734 nm ;

A1: absorbance de l'échantillon à 734 nm.

I.3.3.2. Extraction et dosage des caroténoïdes

Les caroténoïdes totaux ont été déterminés à l'aide d'une méthode colorimétrique. 2 g d'échantillons ont été extraits pendant 30 minutes avec 50 ml d'un solvant ternaire (hexane / éthanol / acétone 50/25/25). Après filtration (Whatman), le solvant a été lavé à trois reprises avec 25 ml d'eau distillée. L'absorbance à 450 nm a été déterminée à l'aide d'un spectrophotomètre (JENWAY 7305). Les résultats ont été obtenus en utilisant la loi de Beer-Lambert et exprimés en EBC mg / g MS et on se référant à la courbe d'étalonnage présentés dans (l'annexe II) (**Ellong, Billard et al. 2015**) .

II. Analyse statistique

La modélisation a été faite en utilisant le logiciel STATISTIQUA v.8.et la validation de modèle a été basé sur le paramètre R^2 .

Les résultats rapportés sur la teneur en humidité, temps de séchage, vitesse de séchage , rétrécissement, densité, teneur en polyphénols, activité antioxydant (DPPH et ABTs) et teneur en caroténoïdes des extraits de carotte sont exprimés par les moyennes plus ou moins les écarts types standards des trois mesures. Pour la comparaison des résultats obtenus, un logiciel JMP pro 10; en se référant de test tuky et le degré de signification de données est pris à la probabilité ($P \leq 0.05$).

Résultats et discussion

I. Teneur en humidité de la carotte fraîche

Le résultat de test d'humidité de la carotte (*Daucus carota* L.) est représenté dans la figure 3. Tel que l'illustre cette dernière, la carotte contient une quantité importante en eau ; voir $92,65 \pm 0,28$ % ce qui montre sa richesse en eau. Ce résultat est inclus dans la gamme (89 % - 98 %) reportée par **Mulet, Berna et al. (1989)**.

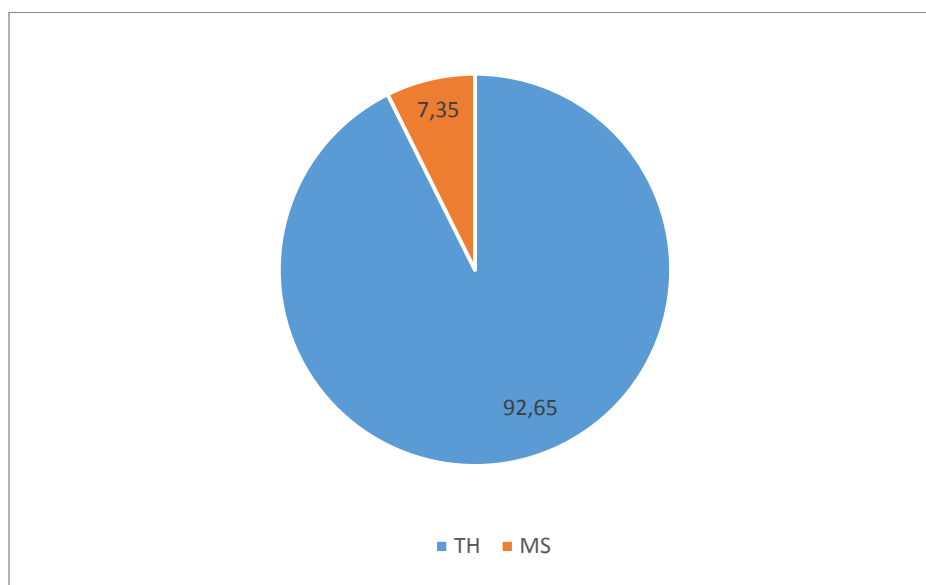


Figure 3 : Teneur en humidité de la carotte fraîche.

II. Cinétique de séchage

Le séchage constitue l'un des principaux moyens de conservation des denrées alimentaires périssables. En effet, en éliminant l'eau, on inhibe l'action des germes microbiens (levures, moisissures, bactéries) responsables du pourrissement (**Boubeghal, Benhammou et al. 2007**).

Le séchage thermique conventionnel (étuve) et innovant (micro-onde) sont les méthodes adoptées dans cette étude, ces méthodes sont souvent utilisées dans le domaine agro-alimentaire pour éviter la détérioration des produits et faire des réserves.

II.1. Cinétique de séchage par micro-onde

La figure 4 représente la perte de masse en fonction du couple temps-puissance du séchage par micro-onde.

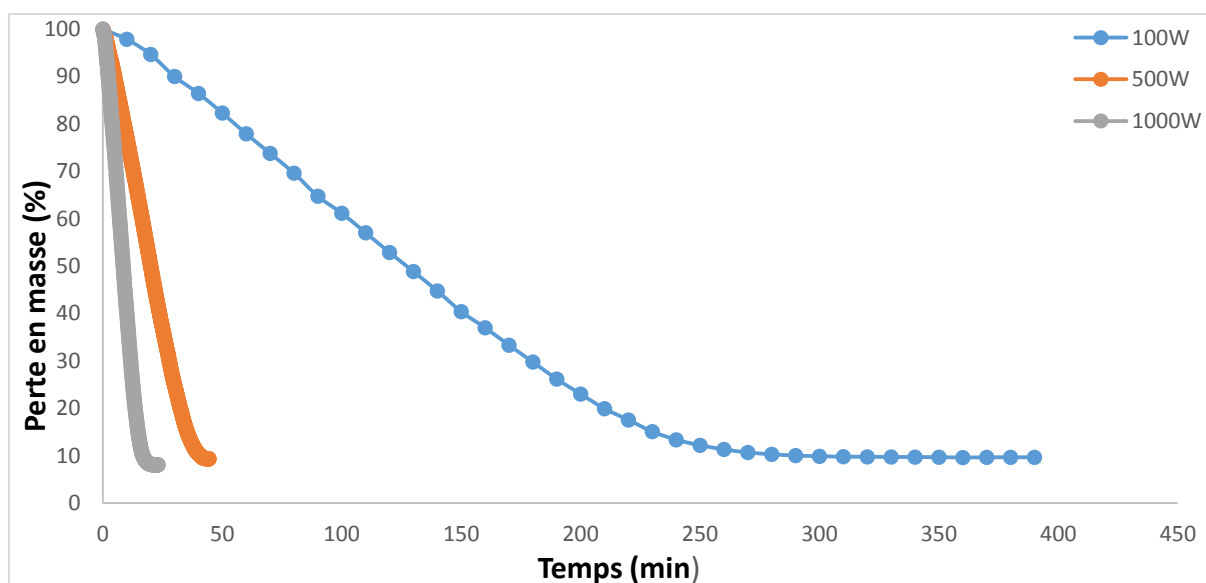


Figure 4 : Variation de la perte en masse (%) à différentes puissances de micro-onde.

La figure 4 montre la cinétique de séchage de la carotte en fonction du couple temps-puissance du séchage par micro-onde. Tel qu'illustré dans cette figure, le séchage se produit en deux principales étapes : l'étape où la perte en masse diminue rapidement suivie d'une seconde étape où la perte en masse diminue lentement. D'après **Li, Raghavan et al. (2010)** un procédé de séchage par microonde peut être divisé en trois périodes : une période de préchauffage, une constante période de température pendant laquelle la plus grande partie du séchage a lieu ; et une période de réchauffement pendant laquelle le taux de séchage diminue et la température de l'échantillon augmente rapidement. Dans notre cas, la première étape (préchauffage) n'a pas été enregistrée, car comme cité par ces auteurs, c'est une étape qui se produit rapidement.

Elle montre également que la puissance de microonde a une influence importante sur la perte, en effet, tel que représenté dans la figure, plus le niveau de puissance est élevé, plus la perte en masse se produit rapidement ce qui conduit à la réduction de temps de séchage. Ainsi, les temps de séchage requis pour sécher la même quantité de carotte étaient de l'ordre de 376,67, 44,08 et 21,00 min pour les puissances 100, 500 et 1000 W dans cet ordre.

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 la carotte est plus rapide lorsque la puissance de chauffage microondes est plus élevée (**Chemat, Tomao et al. 2008**).

Il est à noter le séchage par microonde de la carotte a été rapporté dans des études antérieures par **Sulaeman, Keeler et al. (2001)**, **Changrue (2006)**.

La réduction de temps lors de l'application des hauts niveaux de puissances a été rapportée par plusieurs auteurs ; **Ghanem, Mihoubi et al. (2012)** ; **Alibas (2007)** qui ont démontré que

le taux de déshydratation augmente parallèlement avec les puissances de microonde, plus le niveau de puissance est grand, plus le temps de séchage n'est réduit. Selon Sumnu, Turabi et al. (2005) ; le temps de séchage plus court dans microonde peut être expliqué par une haute pression interne et les gradients de concentration qui augmente l'évaporation de liquide à travers le produit jusqu'à la stabilité. Ce phénomène a été expliqué de la même manière par **Darvishi, Asl et al. (2014)** .

L'analyse statistique de ces résultats a conduit à l'observation des différences significative entre les temps de séchage à 100 ,500 et 1000W. On passant des niveaux faibles de puissance à des hauts niveaux, la perte en eau augmente.

II.2. Cinétique de séchage par étuve

La figure 5 représente la perte de masse en fonction du couple temps-température du séchage par l'étuve.

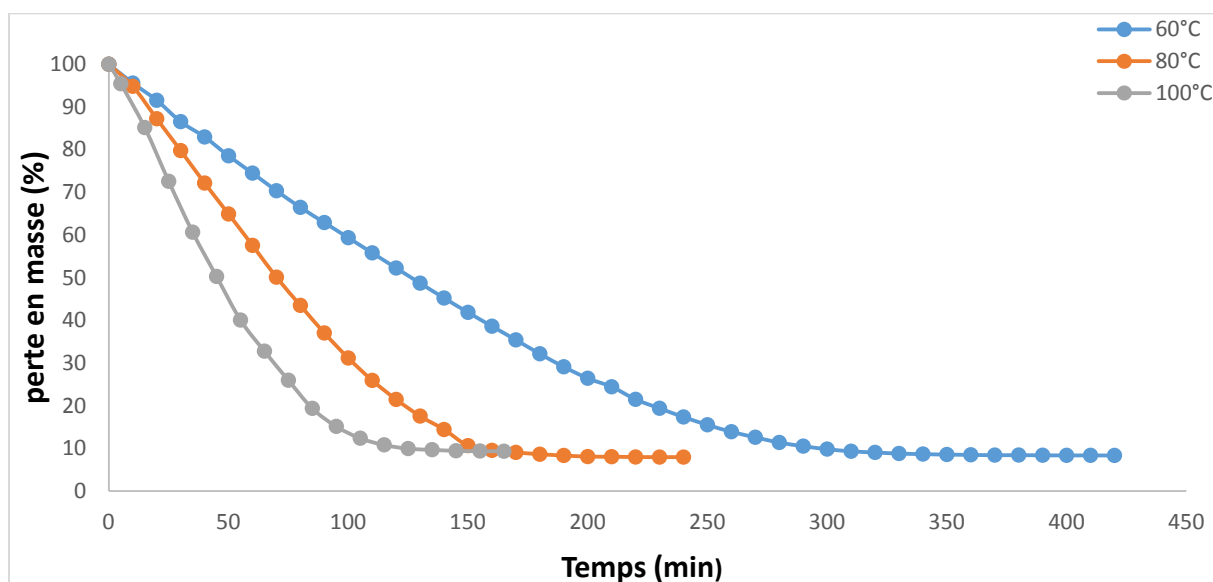


Figure 5 : Variation de la perte en masse (%) à différentes température de l'étuve.

Comme le cas de séchage par microonde, le séchage à l'étuve se produit en deux phases, la première où la teneur en humidité est réduite rapidement, l'autre phase de séchage lent. Dans le cas de l'étuve, la stabilité du poids peut être expliquée par le fait que la température de la surface atteint celle de l'air de séchage et la force de migration de l'eau de l'intérieur vers l'extérieur devient insuffisante. D'autre part, il est également possible qu'il n'y est plus d'eau libre dans le produit. Par conséquent, l'humidité à surface est en équilibre avec celle de l'air de séchage, ce qui signifie que le séchage est terminé (**BONAZZI and BIMBENET 2003**).

Résultats et discussion

La même figure montre que la température de séchage a un effet important sur le temps total de séchage. En effet, tel qu'on peut l'observer sur la figure, le temps de séchage se réduit, on passant d'une température faible à une haute température, et les temps requis pour sécher à 60, 80 et 100 °C étaient respectivement de l'ordre de 410,00 ; 236,67 et 148,33 min. La même observation a été rapportée par d'autres auteurs ;**Lahmari, Fahloul et al. (2012), Cheftel, Cuq et al. (1976)**, qui ont démontré que plus la température augmente, le temps de séchage se réduit.

L'analyse statistique de ces résultats a permis d'observer des différences significatives entre les temps de séchage à 60 ;80 et 100 °C. On passant des niveaux faibles de température à des hauts niveaux, la perte en eau augmente.

II.3. Étude comparative du séchage par microonde et à l'étuve de la carotte

Tableau V : Temps et vitesses moyennes de séchage de la carotte aux microondes et à l'étuve

Procédés	Temps (min)	Vitesse (kg eau/kgMS.min)
microonde		
100W	376,67± 15,28 ^{aB}	2,32± 0,12 ^{cC}
500W	44,08± 0,51 ^{bE}	19,88± 2,42 ^{bB}
1000W	21,00± 2,17 ^{cE}	45,16± 2,07 ^{aA}
Etuve		
60°C	410,00± 10,00 ^{aA}	2,38± 0,13 ^{cC}
80°C	236,67± 5,77 ^{bC}	4,40± 0,26 ^{bC}
100°C	148,33± 7,64 ^{cD}	5,71± 0,25 ^{aC}

Les valeurs sont exprimées sous forme de moyennes ± écart-types

a, b : les mêmes lettres indiquent que les valeurs moyennes ne sont pas significativement différentes à un niveau de confiance de 95 % ($p < 0,05$) pour le même procédé.

A, B : les mêmes lettres indiquent que les valeurs moyennes ne sont pas significativement différentes à un niveau de confiance de 95 % ($p < 0,05$) pour les deux procédés.

Les deux procédés de séchage ; microonde et étuve ont été comparés sur la base des résultats de temps de séchage ainsi que sur la base des vitesses moyennes correspondantes pour chaque température et chaque puissance. Le résultat de l'analyse statistique de ces deux paramètres est représenté dans le tableau V. On consultant ce dernier ; on constate que le séchage par microonde permet à une réduction importante de temps surtout lorsque on implique les hauts niveaux 500 et 1000 W. Cependant, il existe des chevauchements entre la faible puissance (100 W) et les hauts niveaux de température 80 et 60 °C. L'efficacité du procédé de séchage par microonde en termes de réduction de temps par rapport au séchage conventionnel peut

être expliquée par le fait que le rayonnement généré par le micro-onde pénètre directement dans l'échantillon. La chaleur a été générée à l'intérieur de l'échantillon et a fourni un chauffage rapide et uniforme dans tout le produit entier, créant ainsi un grand différentiel de pression de vapeur entre le centre et la surface du produit et permettant le transport rapide et l'évaporation de l'eau (**Inchuen, Narkrugsa et al. 2008**). Tandis que Lors du séchage à l'étuve, la couche externe du produit est chauffée par convection tandis que la conduction chauffe le reste de l'échantillon. L'humidité est initialement éliminée de la surface, créant ainsi un gradient d'humidité constituant le mécanisme principal de l'écoulement du liquide vers l'extérieur. Les principaux inconvénients de la séchage à l'air sont de longues durées de séchage, des dommages aux caractéristiques sensorielles (**Bouraoui, Richard et al. 1994**).

D'après les résultats présentés dans le tableau nous constatons qu'on passant d'un niveau de puissance à un autre ou d'une température à une autre, des différences significatives s'observent pour les temps et les vitesses de séchage et que ces deux derniers sont inversement proportionnels entre eux. L'analyse statistique a montré une différence significative entre la 500 et 1000 W, à leur tour, les trois températures 60 ,80 et 100 °C, et la puissance 100 W ne présentent pas une différence significative en termes de vitesse.

III. Modélisation des cinétiques de séchage

Les résultats de la modélisation des cinétiques de séchage par microonde et étuve sont illustrés dans les tableaux.

Tableau VI : Modélisation de la cinétique de séchage par microonde

Modèles	Coefficients et constantes de séchage				Paramètre statistique (R ²)
Newton	100W	k=0,007811			0,933
	500W	k=0,047290			0,909
	1000W	k=0,114808			0,914
Henderson et Pabis	100W	n=1,161721	k=0,008910		0,955
	500W	n=1,172644	k=0,055522		0,941
	1000W	n=1,199677	k=0,135441		0,946
Logarithmique	100W	a=1,301580	k=0,005938	c=-0,200977	0,981
	500W	a=2,192704	k=0,016506	c=-1,135193	0,994
	1000W	a=1,450972	k=0,075415	c=-0,339921	0,983
Page	100W	k=0,000215	n=1,714472		0,996
	500W	k=0,004403	n=1,763703		0,993
	1000W	k=0,017396	n=1,818946		0,995

Tableau VII : Modélisation de la cinétique de séchage par étuve

Modèles	Coefficients et constantes de séchage				Paramètre statistique (R ²)
Newton	60°C	k=0,007561			0,958
	80°C	k=0,013509			0,951
	100°C	k=0,022293			0,953
Henderson et Pabis	60°C	n=1,111507	k=0,008316		0,969
	80°C	n=1,128295	k=0,015015		0,965
	100°C	n=1,135818	k=0,024913		0,968
Logarithmique	60°C	a=1,220311	k=0,005784	c=-0,164686	0,990
	80°C	a=1,234254	k=0,010770	c=-0,153064	0,986
	100°C	a=1,213112	k=0,018863	c=-0,121014	0,985
Page	60°C	k=0,000709	n=1,465304		0,994
	80°C	k=0,000952	n=1,590452		0,997
	100°C	k=0,002178	n=1,582214		0,998

Les quatre modèles utilisés dans la présente étude (Lewis, Henderson et Pabis, logarithmique et Page) décrivent l'évolution de la cinétique de séchage des tranches de carotte.

La validation du meilleur modèle est basée sur le paramètre statistique ; coefficient de détermination (R²). D'après les résultats illustrés dans les tableaux, il s'avère que les valeurs R² les plus élevées sont obtenues avec le modèle Page, ce qui permet de choisir le modèle Page comme étant le meilleur modèle aussi bien pour le microonde et étuve.

IV. Évaluation de la qualité des poudres séchées

IV.1. Teneurs en humidité des poudres séchées

Les figures 6 et 7 montrent les résultats des teneurs en humidité (TH) des poudres obtenues après séchage à différentes puissances du microonde et température de l'étuve, respectivement.

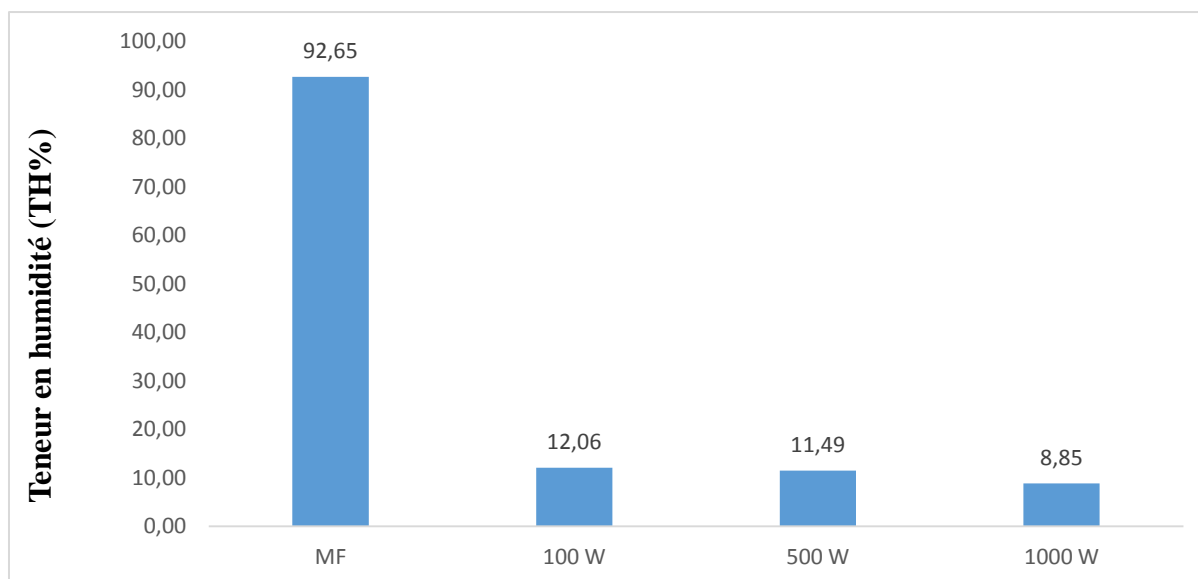


Figure 6 : Teneur en humidité des poudres séchées par micro-onde.

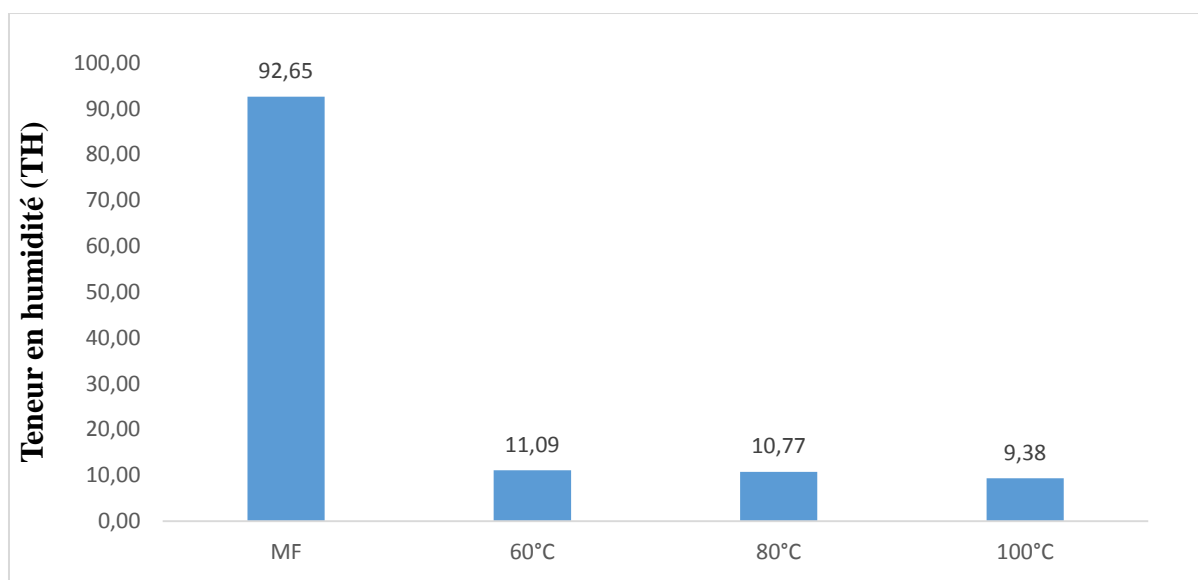


Figure 7 : Teneur en humidité des poudres sèche par étuve.

D'après les résultats présentés dans ces figures, nous remarquons que les deux procédés de séchage appliqués ont conduit à la réduction que la teneur en humidité dans la matière fraîche qui est de 92,65 % jusqu'à 12,06 ; 11,49 et 8,85 % pour les puissances de microonde ; 100 ; 500 et 1000 W, dans cet ordre et jusqu'à 11,09 ; 10,77 et 9,38 % pour les températures 60 ; 80 et 100 °C, respectivement. On constate également que la réduction la plus importante se produit à des hauts niveaux de puissances et températures.

L'analyse statistique n'a pas montré une différence significative entre les poudres séchées 100 et 500 W mais ces deux derniers présentes une différence avec celle séchée à 1000 W ;

Dans le cas de l'étuve les poudres séchées aux trois températures 60 ;80 et 100 °C ne présentent pas une différence significative entre eux.

La comparaison entre les deux procédés de séchage en termes de teneur en humidité des poudres de carotte séché est illustrée dans le tableau suivant :

Tableau VIII : Résultats de l'analyse statistique des teneurs en humidité.

Procédés de séchage	Teneurs en humidité (%)
microonde	
100W	12,06±0,45 ^{aA}
500W	11,49±0,56 ^{aAB}
1000W	8,85±1,21 ^{bC}
Etuve	
60°C	11,09±0,95 ^{aABC}
80°C	10,77±1,35 ^{aABC}
100°C	9,38±0,52 ^{aBC}

L'analyse statistique a montré qu'il n'y a pas une différence significatives entre les poudres séchés par microonde à 100 et 500 W et les poudre séchées par l'étuve à 60 et 80 °C, d'autre part les trois températures 60 ;80 et 100 °C ne présente pas une différence significative avec la puissance 500 W et 1000 W, mais ces dernières sont statistiquement différentes.

IV.2. Qualités physiques

Lors de séchage, des changements considérables dans la structure du produit peuvent être observés(**Ghanem, Mihoubi et al. 2012**). Ainsi, on entend par bonne qualité : une capacité de réhydratation rapide, une faible densité apparente, un faible retrait et une couleur attrayante(**Maskan 2001**). C'est la raison pour laquelle les deux paramètres rétrécissement et densité apparente ont été évalués.

IV.2.1. Rétrécissement

Le rétrécissement des denrées alimentaires est un phénomène physique commun observé lors de différents processus de séchage (**Mayor and Sereno 2004**).

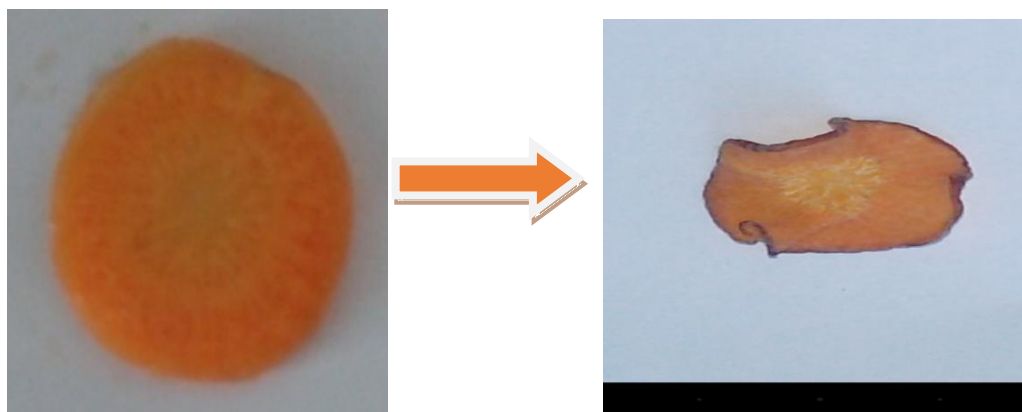


Figure 8 : Photographie d'une rondelle de carotte avant et après séchage.

Tableau IX: Résultats de l'évaluation des paramètres physiques.

Procédés de séchage	Rétrécissement (%)	Densité (g/cm ³)
microonde		
100W	10,26± 0,57 ^{aB}	0,48±0,01 ^{cD}
500W	10,65± 1,01 ^{aB}	0,58±0,01 ^{bAB}
1000W	11,69±0,81 ^{aB}	0,61±0,01 ^{aA}
Étuve		
60°C	11,39±1,14 ^{aB}	0,43±0,02 ^{bE}
80°C	12,27±0,25 ^{aA}	0,54±0,01 ^{aC}
100°C	12,23±0,10 ^{aA}	0,55±0,01 ^{aBC}

D'après les résultats présents dans le tableau, nous remarquons que l'augmentation des puissances du microonde et températures permet un retrait plus important de la carotte

L'analyse statistique des résultats n'a pas montré un effet significatif des deux procédés de séchage ; micro-onde et étuve sur le retrait de volume de la carotte. Les contractions du volume sont d'environ 10,26 ± 0,57 ; 10,65 ± 1,01 ; 10,69 ± 0,81% pour les puissances de séchage par microonde ; 100, 500 et 1000W respectivement. Dans le cas de séchage de l'étuve les contractions du volume étaient d'environ 11,39±1,14 ; 12,27±0,25 et 12,23±0,10 % pour les températures ; 60 ;80 et 100 °C.

Le même tableau montre que le rétrécissement de la carotte lors du séchage à l'étuve était plus important que le séchage aux microondes.

Nous constatons également que le rétrécissement est généralement étroitement lié à la quantité d'eau libérée pendant le séchage, Une teneur en humidité plus faible et, par conséquent, un retrait plus important.

Une relation linéaire entre le retrait et la teneur en humidité pendant le séchage est rapporté dans plusieurs travaux utilisant différentes procédures de séchage de nombreux fruits et légumes (Amami, Khezami et al. 2017).

IV .2.2. Densité

La densité apparente est l'un des propriétés physiques importantes caractérisant la texture et la qualité des aliments secs et moyennement humides (**Marousis and Saravacos 1990**), elle est aussi importante, car les consommateurs s'attendent à ce que la masse indiquée sur l'emballage corresponde à un volume remplissant l'emballage presque totalement. Cela présente souvent des difficultés dans le traitement des aliments. Dans de nombreux cas, les producteurs souhaitent proposer des poudres combinant un grand volume avec une petite masse (**Schubert 1987**).

D'après le tableau, on constate, que la densité augmente proportionnellement avec l'augmentation des puissances et des températures de séchage, Ainsi, les densités enregistrées étaient de l'ordre 0,48 ; 0,58 et 0,61 g/ml pour les puissances de microondes 100 ;500 et 1000 W respectivement. Et de l'ordre de 0,43 ; 0,54 et 0,55 g/cm³ pour les températures 60 ;80 et 100 °C.

Par corrélation des résultats de la densité à ceux de la teneur en humidité (Tableau VIII), nous constatons que la densité augmentait à mesure que la teneur en humidité de la poudre est faible. La relation négative de la densité apparente avec la teneur en humidité constaté dans la présente étude a été signalée également par de nombreux auteurs ;(**Wang and Brennan 1995; Al-Muhtaseb, McMinn et al. 2004; Aydin 2007**), pour le séchage d'échantillons de pomme de terre, de gel d'amidon de pomme de terre et de noyau, respectivement.

L'analyse statistique a montré qu'il n'y a pas une différence significative entre les trois puissances 100 ;500 et 1000 W alors que dans le cas de l'étuve la 60 et 80 °C ne présente pas une différence mais présente une différence pour la 100 °C, cela est dû probablement en degré de broyage de la carotte.

La comparaison entre les deux procédés de séchage en termes de densité est illustrée dans le tableau précédent

L'analyse statistique des résultats illustré dans le tableau ont montré que les poudres de carotte séchées à la puissance 500 W ne présente pas des différences significatives avec la puissance 1000 W d'une part, et d'autre part avec la température 100 °C et cette température ne présente pas des différences avec la poudres de carotte séché à 80 °C, par ailleurs les puissances 500 et 1000 W et les températures 80 et 100 °C présente des différences pour la puissance 100 W et température 60 °C.

IV.3. Qualité phytochimique

IV.3.1. Teneur en polyphénols totaux

✓ Etude préliminaire

L'étude préliminaire a été réalisée afin de sélectionner le meilleur solvant, ainsi que sa meilleure concentration permettant d'obtenir un meilleur rendement en polyphénols.

✓ Influence du type de solvant

L'extraction des composés phénoliques à partir de matrices végétales peut être effectuée en utilisant des solvants organiques dont les plus utilisés sont l'éthanol, méthanol, acétone, l'eau. (Dahmoune, Boulekbache et al. 2013).

L'efficacité de l'extraction est directement liée à la compatibilité entre les composés phénoliques et les solvants utilisés, ainsi lorsque la polarité des composés est adaptée avec celle du solvant, ils seront facilement extraits. C'est pourquoi l'effet de trois solvants ; acétone, éthanol et méthanol a été étudié en expériences préliminaires. La figure 9, représente les résultats obtenus avec les différents solvants utilisés pour l'extraction des polyphénols totaux.

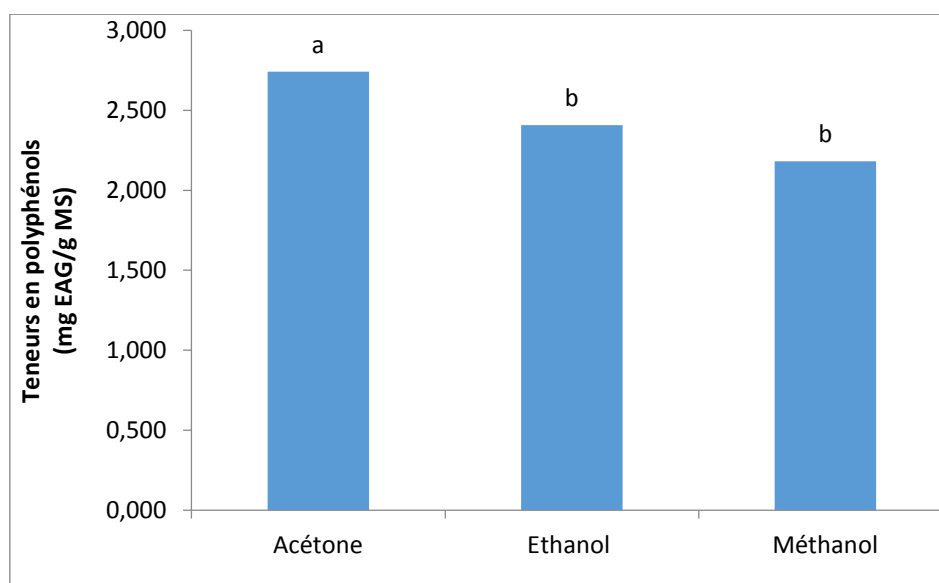


Figure 9 : Résultat de l'étude de l'influence du type de solvant sur le rendement de PPT.

D'après les résultats obtenus, il ressort que le meilleur rendement en PPT est obtenu en utilisant l'acétone comme solvant d'extraction suivi de l'éthanol et du méthanol. Ce résultat s'explique par le fait que l'acétone a une polarité médiane par rapport aux autres solvants cités, ce qui le rend plus efficace dans la dégradation des parois cellulaires dont le caractère est apolaire, ce qui permet par la suite une meilleure extraction des composés phénoliques.

L'étude statistique a montré une différence significative entre l'acétone et les deux autres solvants ; méthanol et l'éthanol tandis que ces derniers n'ont montré aucune différences significative. A cet effet l'acétone a été fixée pour la prochaine expérience.

✓ Influence de la concentration de solvant

La concentration du solvant est un autre paramètre qui peut influencer le rendement en PPT. A cet effet, après avoir fixé l'acétone comme meilleur solvant, l'effet de sa concentration a été étudié en extrayant les PPT avec différentes concentrations de l'acétone ; 30 ; 40 ; 50 ; 60 ; 70 ; 80 ; 90 et 100 %. Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure 10.

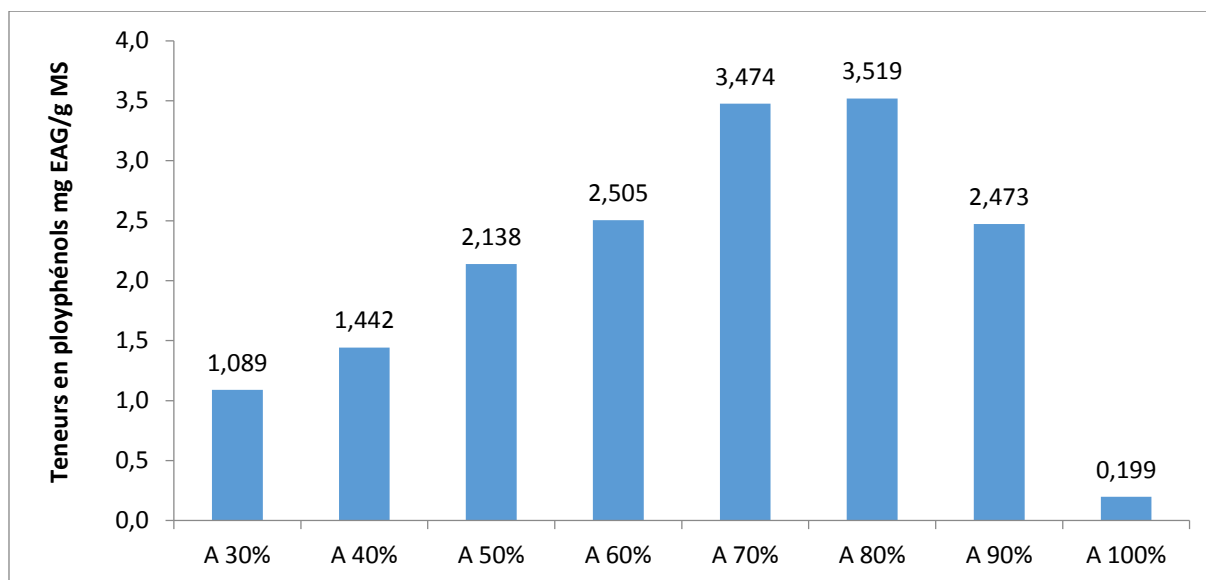


Figure 10 : Résultat de l'étude de l'influence de la concentration du solvant sur le rendement en PPT.

Les résultats obtenus montrent que les teneurs en polyphénols varient en fonction de la variation de la concentration du solvant utilisée. Ainsi ; tel qu'illustré dans la figure ; le rendement en PPT augmente avec l'augmentation de la concentration de solvant du 30 à 80 %. Au-delà de cette concentration, le rendement en PPT diminue et il semble que l'acétone 100 % est le moins extractif des PPT.

On n'a pas constaté de différence significative entre les extraits 70 et 80 %. A cet effet, l'acétone 70 % a été fixée pour extraire les PPT à partir des différentes poudres séchées au microonde et à l'étuve.

L'extraction à partir des poudres séchées par microonde et étuve a été faite après avoir fixé l'acétone à 70 % comme solvant d'extraction. Les résultats du dosage des polyphénols totaux ont été exprimés en mg d'équivalent d'acide gallique (mg EAG/g MS) en se référant à une courbe d'étalonnage réalisée dans les mêmes conditions (**Annexe II**).

IV.3.1.1. Teneur en polyphénols totaux poudres de carottes séchées au microonde

Les résultats du dosage des polyphénols totaux obtenus pour les poudres de carotte séchées au Micro-onde sont illustrés dans la Figure 11.

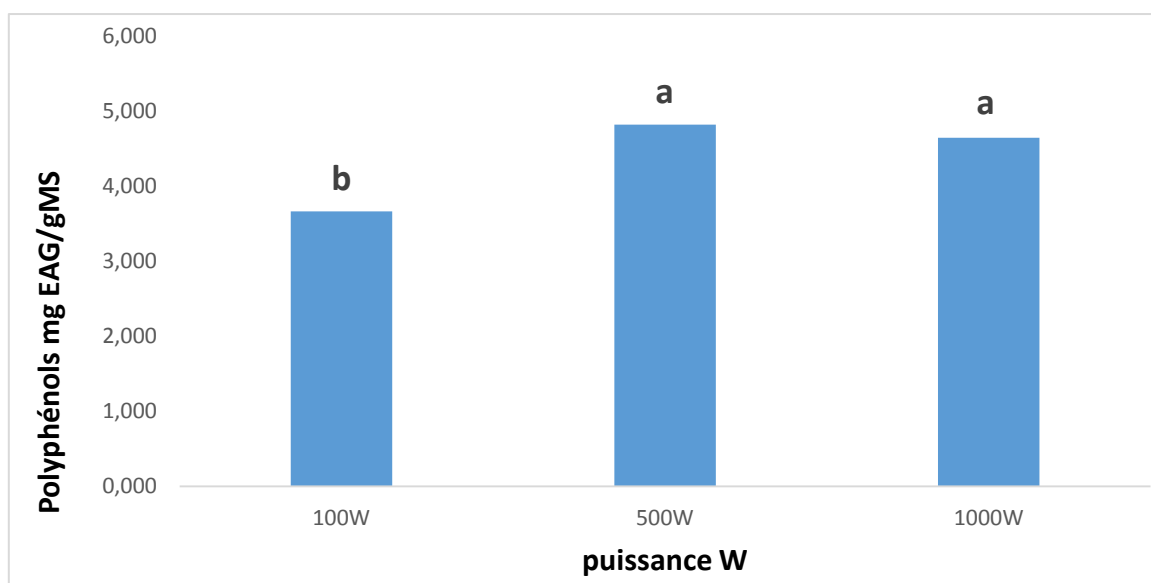


Figure 11: Teneurs en polyphénols totaux des poudres de carotte séchée par micro-onde.

Les résultats du dosage des PPT des extraits des poudres de carotte séchées par micro-onde montrent que les concentrations ont été variables suivant le niveau de puissances de séchage appliqué. Les teneurs obtenues ont été de l'ordre $3,66 \pm 0,26$; $4,81 \pm 0,11$ et $4,64 \pm 0,26$ mg/g MS pour les niveaux de puissances 100 ; 500 et 1000 W, respectivement. L'analyse statistique de ces résultats a conduit à une absence de différence significative entre les teneurs en composés phénoliques des échantillons séchés à 500 et 1000 W, mais ces derniers ont présenté des valeurs significativement supérieures à celle de l'échantillon séché à 100 W. Les niveaux de puissances de micro-ondes utilisées ont donc une influence significative sur la teneur en composés phénoliques des échantillons séchés.

La faible teneur obtenue avec la poudre séchée à 100 W, ce résultat pourrait s'expliquer par la longue période de séchage pendant laquelle le produit est exposé à l'oxygène atmosphérique qui a des effets néfastes sur certains aspects qualitatifs de composés bioactifs. (Arslan and Musa Özcan 2010). Par contre les teneurs élevées en PTT aux puissances 500 et 1000 W, s'expliquent probablement par les courtes durées de séchage qui sont de $44,08 \pm 0,51$ et de $21,00 \pm 2,17$ min, respectivement qui n'ont pas permis la dégradation des PPT.

Il est à noter que les effets du processus de séchage par MO sur les composés phénoliques des aliments ont été étudiés au paravent, certains auteurs ont signalé qu'il y a un effet sur les composés phénoliques (Akyıldız, Aksay et al. 2004), et c'est le cas observé dans la présente étude. Par contre certains d'autres ont déclaré qu'il n'y a pas de changement important dans la concentration de ces composés (Dewanto, Wu et al. 2002).

IV.3.1.2. Teneur en polyphénols totaux des poudres de carottes séchées à l'étuve

Les résultats obtenus pour les polyphénols totaux des extraits des poudres de carottes séchées à l'étuve sont présentés dans la figure 12.

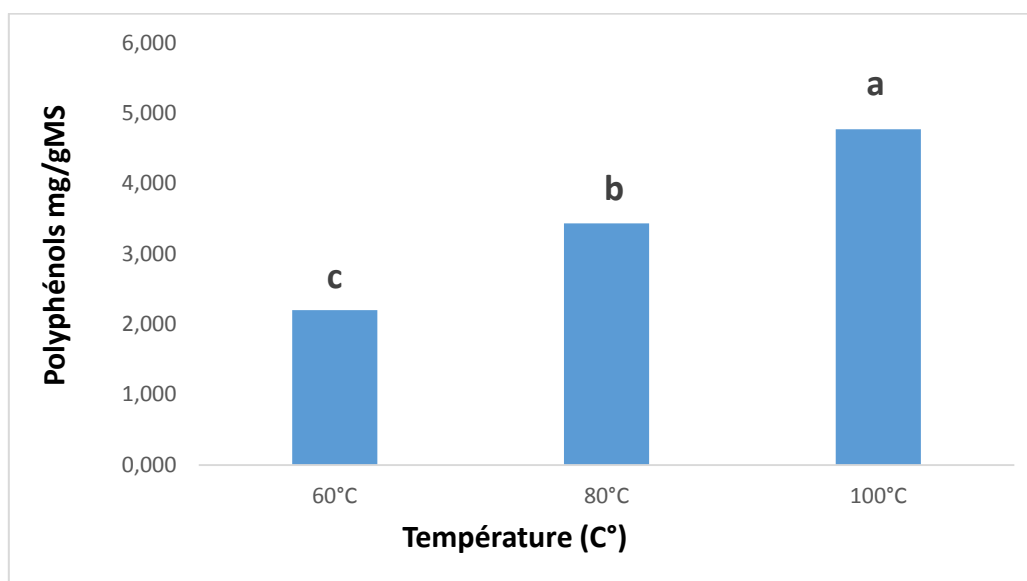


Figure 12 : Teneurs en polyphénols totaux des poudres de carotte séchée par étuve.

Les résultats du dosage des PPT des extraits des poudres de carotte séchées par étuve montrent à leur tour des concentrations variables suivant la variabilité de la température de séchage appliquée. Les teneurs obtenues ont été de l'ordre $2,20 \pm 0,20$; $3,43 \pm 0,26$ et $4,70 \pm 4,77$ EAG mg/g MS pour les différentes températures 60 ;80 et 100 °C, respectivement. L'analyse statistique de ces résultats a conduit à l'observation des différences significatives entre les teneurs en composés phénoliques des échantillons séchés à 60 ;80 et 100 °C. On passant des niveaux faibles de température à des hauts niveaux, les teneurs en PTT augmentent dont la plus importante teneur est obtenue lors de séchage à 100 °C. Les niveaux de température étudiée ont donc une influence significative sur la teneur en composés phénoliques des échantillons séchés. Les faibles teneurs à 60 °C en composés phénoliques peuvent être expliqués par sa dénaturation sous l'effet aussi bien de temps et de la température (**Klimczak, Malecka et al. 2007**).

IV.3.1.3. Comparaison entre les deux procédés de séchage en termes de teneur en PPT

La comparaison entre les deux procédés de séchage en termes de teneur en PPT est illustrée dans le tableau suivant

Tableau X: Résultats de l'analyse statistique des polyphénols totaux.

Procédés de séchage	Teneurs en PPT	% d'inhibition de DPPH	% d'inhibition d'ABTs
microonde			
100W	3,66±0,26 ^{bB}	38,93±2,16 ^{bB}	53.44±1.94 ^{bB}
500W	4,81±0,11 ^{aA}	58,15±2,29 ^{aA}	83.29±1.04 ^{aA}
1000W	4,64±0,26 ^{aA}	56,34±0,46 ^{aA}	82.21±1.01 ^{aA}
Etuve			
60°C	2,20±0,20 ^{cC}	19,43±0,92 ^{cC}	45.40±0,92 ^{cC}
80°C	3,43±0,26 ^{bB}	36,24±0,74 ^{bB}	51.44±3.92 ^{bB}
100°C	4,77±0,27 ^{aA}	57,79±1,89 ^{aA}	82.75±1.78 ^{aA}

D'après les résultats présents dans le tableau nous remarquons que l'analyse statistique n'a pas montré une différence significative entre les puissances 500 et 1000 W et la température 100 °C, qui contenaient les teneurs importantes en PPT mais qu'ils sont statistiquement différentes par rapport à les autres températures et puissances. A leur tour la puissance ; 100 W et la température ; 80 °C n'ont pas présenté une différence significative entre eux et contenaient des teneurs moyennes en PPT mais elles sont différents à la température 60 °C qui en contient la teneur la plus faible en PPT.

IV.3.2. Détermination de l'activité antioxydante des polyphénols totaux

Les polyphénols sont doués d'activité antioxydante importantes et diverses, probablement dû à leurs diversités structurales. Les sites et le nombre des groupes hydroxyles sur les groupes phénoliques sont supposés être reliés à leur relative toxicité envers les microorganismes, avec l'évidence que le taux d'hydroxylation est directement proportionnel à la toxicité (Cowan 1999).

IV.3.2.1. Activité scavenger sur le radical 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle (DPPH)

Le radical DPPH[·] est l'un des composés les plus utilisés généralement pour l'évaluation rapide et directe de l'activité antioxydant en raison de sa stabilité en forme radicale et la simplicité de l'analyse(Bozin, Mimica-Dukic et al. 2008).

IV.3.2.1.1. Activité anti-oxydante des extraits de la carotte séchée au micro-onde

Les pourcentages d'inhibition du radical DPPH par les extraits phénoliques de carottes séchées par microonde sont présentés dans la Figure 13.

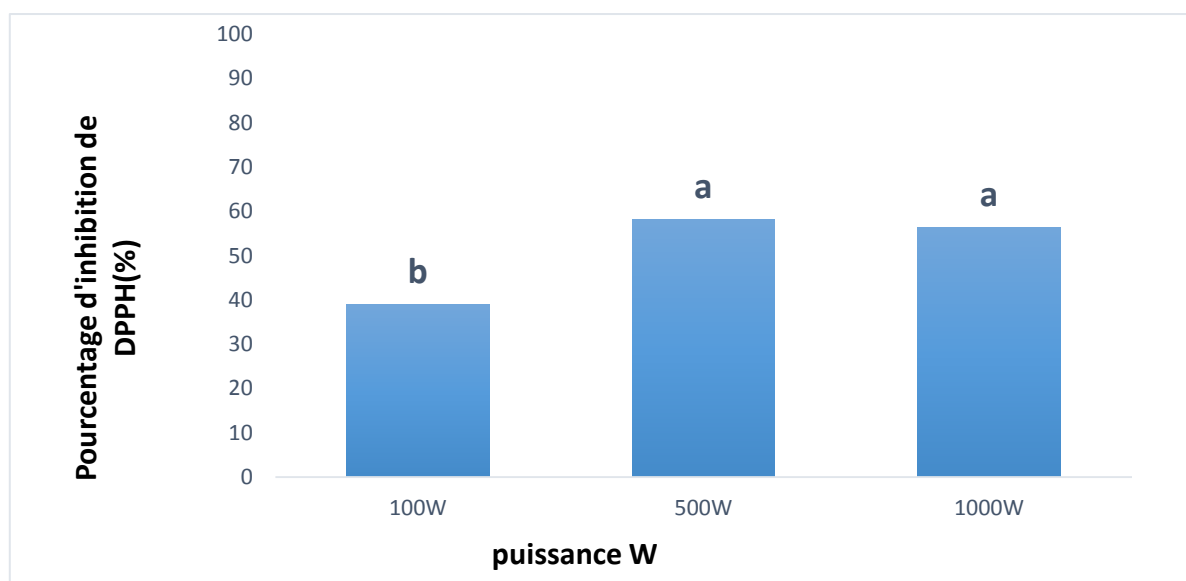


Figure 13 : Pourcentage d'inhibition du radical DPPH par les extraits phénoliques des poudres de carotte séchées par microonde.

La Figure 13 représente les résultats de mesure des pourcentages d'inhibition du radical DPPH en fonction de la puissance de séchage. Les résultats obtenus avec ce test révèlent que tous les extraits de poudres de carotte sont des anti-radicalaires.

La même figure montre également que le pourcentage d'inhibition du radical libre est dépendant de la puissance de séchage appliquée. En effet, tels que l'on peut constater, les pourcentages les plus importants sont enregistrés à 500 et 1000 W avec des pourcentages de l'ordre de $58,146 \pm 0,455$ et $56,344 \pm 0,455\%$ respectivement, par contre l'échantillon séché à 100 W présentait la plus faible activité anti-radicalaire avec un pourcentage de $38,934 \pm 2,165\%$. L'analyse statistique a montré que les poudres séchées à 500 et à 1000 W ne présentent pas une différence significative entre elles alors que la poudre séchée à 100 W révèle une différence significative.

IV.3.2.1.2. Activité anti-oxydante des extraits de la carotte séchée à l'étuve

Les pourcentages d'inhibition du radical DPPH par les extraits phénoliques de carotte séchée par étuve sont présentés dans la Figure 14.

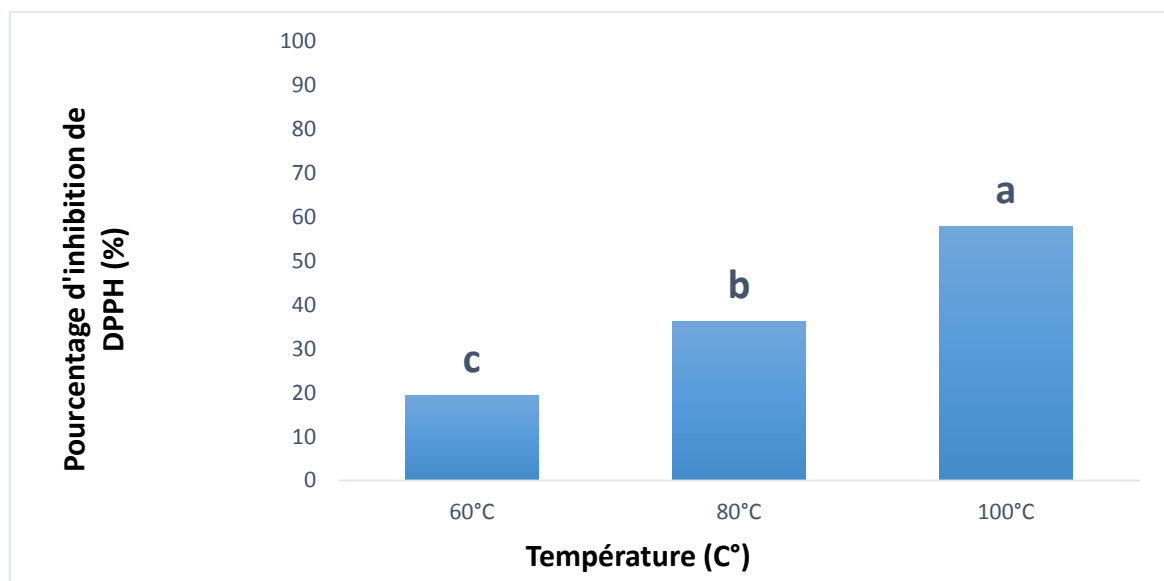


Figure 14 : Pourcentage d'inhibition du radical DPPH par les extraits phénoliques des poudres de carotte séchée par l'étuve.

La Figure 14 représente les résultats de mesure des pourcentages d'inhibition du radical DPPH en fonction de la température de séchage. Les résultats obtenus avec ce test révèlent que tous les extraits de poudres de carotte sont des anti-radicalaires.

La même figure montre que le pourcentage d'inhibition du radical libre est dépendant de la température de séchage appliquée. Les teneurs obtenues ont été de l'ordre $57,787 \pm 1,885$; $36,239 \pm 0,735$ et $19,428 \pm 0,918$ % pour les différentes températures 60 ; 80 et 100 °C, respectivement. En effet, tel que l'on peut constater, le pourcentage le plus important est enregistré à 100 °C, par contre l'échantillon séché à 60 °C présentait la plus faible activité anti-radicalaire. L'analyse statistique de ces résultats a conduit à l'observation des différences significative entre les pourcentages d'inhibition du radical libre des échantillons séchés à 60, 80 et 100 °C.

En se référant aux résultats de dosage des PPT (tableau X). Ces activités peuvent être liées directement à la richesse des extraits en polyphénols car une observation remarquable consiste ; plus l'extrait est riche en PPT, plus il présente une meilleure activité contre le radical DPPH. Ce résultat est confirmé par une bonne corrélation positive entre le pouvoir antioxydant observé et la teneur en PPT qui a été noté dans la présente étude ($r = 0,998$). Il est à noter que **Hatano, Edamatsu et al. (1989)**; **(Duh, Tu et al. 1999)** ont montré à leur tour l'existence d'une corrélation entre les teneurs en phénols totaux et l'activité anti radicalaire. Ceci pourra être justifié par le fait que, les groupements fonctionnels présents dans les composés phénoliques en général peuvent céder facilement un électron ou un proton pour neutraliser les radicaux libres (**CHEN and HO 1995**).

IV.3.2.1.3. comparaison entre les deux procédés de séchage en termes de pourcentage d'inhibition du DPPH

La comparaison entre les deux procédés de séchage en termes de pourcentage d'inhibition du DPPH est illustrée dans (le tableau X).

D'après les résultats présents dans le tableau nous remarquons que l'analyse statistique n'a montré une différence significative entre les poudres séchées à 500 ;1000 W et 100 °C, à leur tour les poudres séchées à 100W et 80 °C ne présentent aucune différence significative entre elles par contre, la poudre séchée à 60 °C a révélé une différence par rapport aux autres poudres.

IV.3.2.2. Activité anti-oxydante par le test ABTs

La méthode de piégeage du radical ABTs est une excellente méthode pour déterminer l'activité anti-oxydante pour une large diversité des substances, comme antioxydants donneurs d'hydrogène ou piègeurs de radicaux en phase aqueuse(Re, Pellegrini et al. 1999). L'activité anti-radicalaire est considérée comme étant la capacité des composés testés à diminuer directement la couleur du radical ABTs. Le contact avec un donneur d'électron du radical $ABTs^{\cdot+}$ conduit à l' $ABTs^+$ et à la décoloration de la solution du bleu foncé en bleu vert (Lien, Ren et al. 1999).

IV.3.2.2.1. Activité anti-oxydante des poudres de la carotte séchées au micro-onde

Les pourcentages d'inhibition du radical ABTs par les extraits phénoliques de carotte séchée par microonde sont présentés dans la Figure 15.

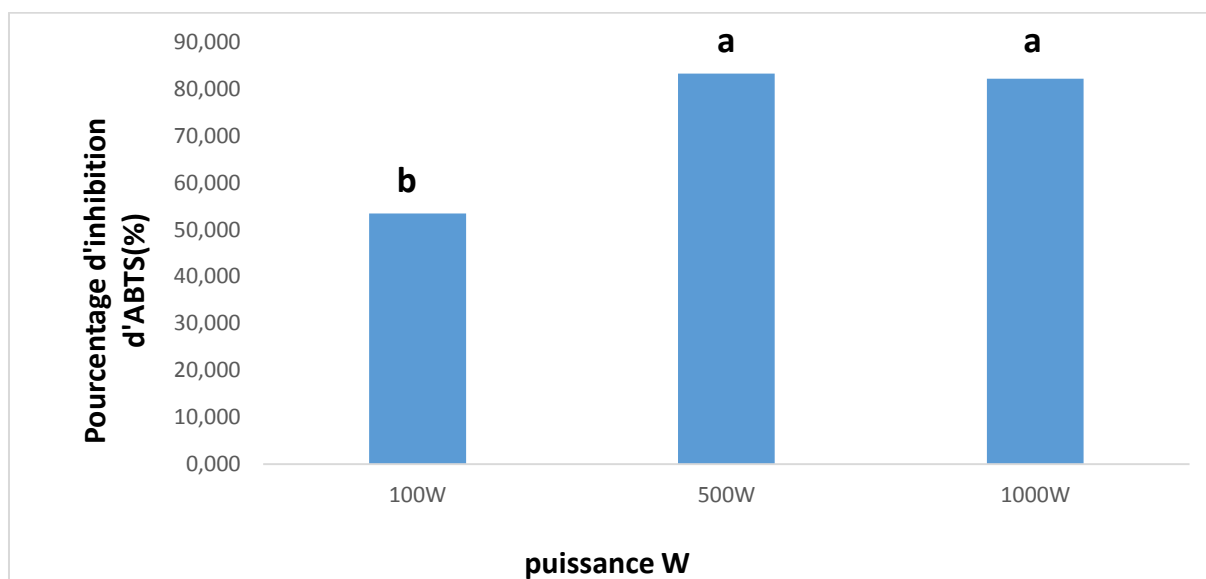


Figure 15 : Pourcentage d'inhibition du radical ABTs par les extraits phénoliques des poudres de carotte séchée par microonde.

La Figure 15 représente les résultats de mesure des pourcentages d'inhibition du radical ABTS en fonction de puissance de séchage. Les résultats obtenus avec ce test révèlent que tous les extraits de poudres de carotte sont des anti-radicalaires.

La même figure montre également que le pourcentage d'inhibition du radical libre est dépendant de la puissance de séchage appliquée. En effet, tel que l'on peut constater, les pourcentages le plus importants sont enregistrés à 500 et 1000 W avec des pourcentages de l'ordre de $83,288 \pm 1,040$ et $82,208 \pm 1,007$ % respectivement, par contre l'échantillon séché à 100W présentait la plus faible activité anti-radicalaire avec un pourcentage de $53,440 \pm 1,938$ %. L'analyse statistique a montré qu'il n'y pas une différence significative entre la 500 et 1000 W mais qui sont statistiquement différents au pourcentage enregistré pour la poudre séchée à 100 W.

IV.3.2.2.2. Activité anti-oxydante des poudres de carotte séchées à l'étuve

Les pourcentages d'inhibition du radical ABTs par les extraits phénoliques de carotte séchées par étuve sont présentés dans la Figure 16.

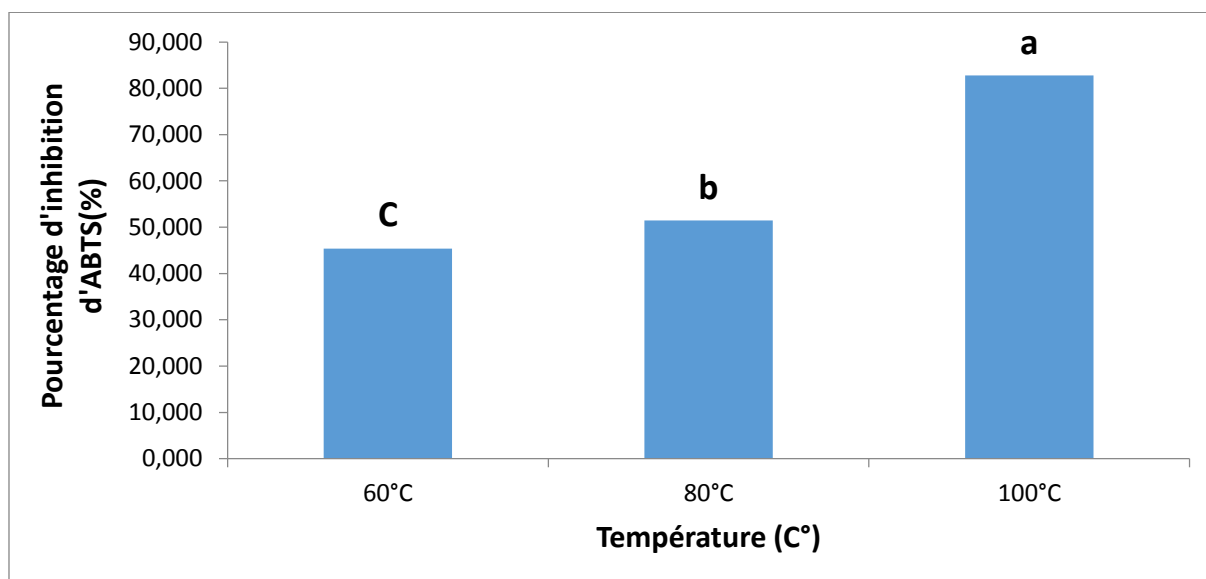


Figure 16 : Pourcentage d'inhibition du radical ABTS par les extraits phénoliques des poudres de carotte séchée par l'étuve.

La figure 16 montre que le pourcentage d'inhibition du radical libre est dépendant de la température de séchage appliquée. Les pourcentages obtenus été de l'ordre $45,402 \pm 1,051$, $51,441 \pm 3,919$ et $82,754 \pm 1,777$ % pour les différentes températures 60 ;80 et 100 °C, respectivement. L'analyse statistique de ces résultats a conduit à l'observation des différences significative entre les pourcentages d'inhibition du radical libre des échantillons séchés à

60 ;80 et 100 °C. On passant des niveaux faibles de températures à des hauts niveaux, le pourcentage d'inhibition du radical libre augmente dont le pourcentage le plus important est enregistré pour la poudres séchés à 100 °C, par contre l'échantillon séché à 60 °C présentait la plus faible activité anti-radicalaire.

IV.3.2.2.3. Comparaison entre les deux procédés de séchage en termes de pourcentage d'inhibition de l'ABTs

D'après les résultats présents dans le (tableau X) nous remarquons que l'analyse statistique n'a montré une différence significative entre les poudres séchées à 500 ; 1000 W et 100 °C, à leur tour les poudres séchées à 100 W et 80 °C ne présentent aucune différence significative entre elles par contre, la poudre séchée à 60 °C a révélé une différence par rapport aux autres poudres.

IV.3.3. Teneur en caroténoïdes

Les caroténoïdes sont des pigments liposolubles responsables de la couleur jaune, rouge et orange de plusieurs fruits et légumes, qui constituent la source majeure dans l'alimentation humaine (**Rao and Rao 2007**). Les carottes contiennent la plus grande quantité de β -carotène de fruits et légumes communs (**Dutta, Chaudhuri et al. 2005**). C'est le réseau pour laquelle le dosage des caroténoïdes totaux a été effectué dans la présente étude.

Les résultats de dosage des caroténoïdes obtenus, exprimés en mg d'équivalent de la β -Carotène (E. β -C.) par mg/ g matières sèche d'échantillon, en se référèrent à une courbe d'étalonnage réalisée dans les mêmes conditions (**Annexe II**).

IV.3.3.1. Teneur en caroténoïdes des poudres de carotte séchées par microonde

Les résultats obtenus pour les caroténoïdes totaux des extraits des carottes séchées par microonde sont présentés dans la figure 17.

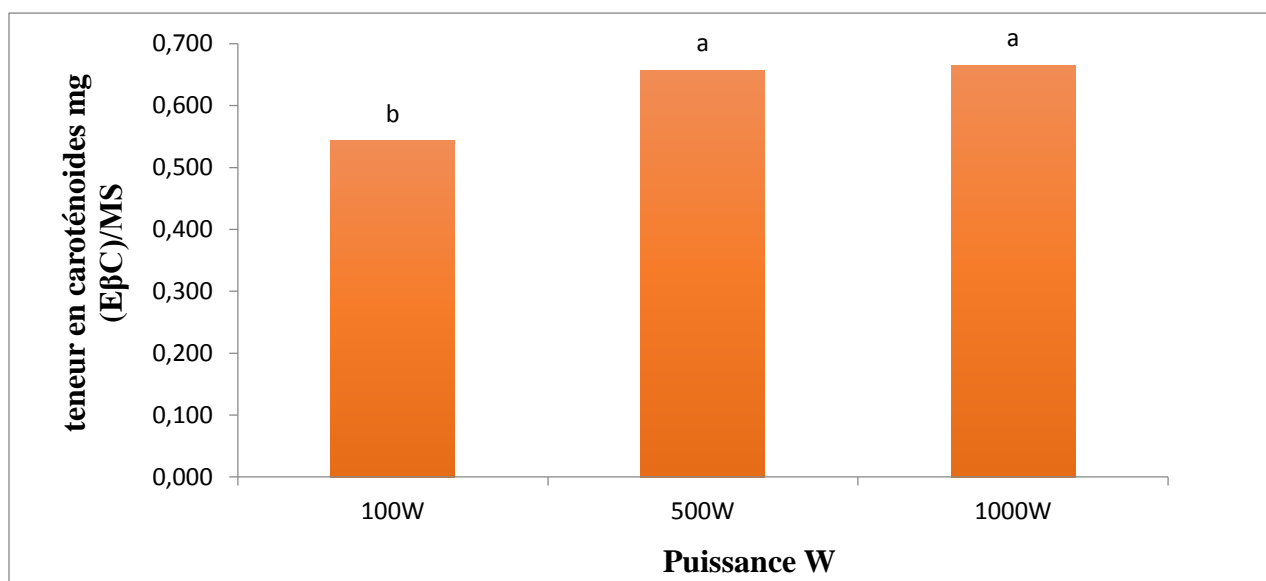


Figure 17 : Teneur en caroténoïdes totaux des poudres de la carotte issues de séchage par microonde.

Les résultats du dosage des caroténoïdes des extraits des poudres de carotte séchées par micro-onde montrent que les concentrations ont été variables suivant le niveau de puissances de séchage appliqué. Les teneurs obtenues ont été de l'ordre $0,54 \pm 0,03$, $0,66 \pm 0,01$ et $0,67 \pm 0,01$ (EβC mg/g MS) pour les niveaux de puissances 100 ;500 et 1000 W, respectivement. L'analyse statistique de ces résultats a conduit à une absence de différence significative entre les teneurs en caroténoïdes des échantillons séchés à 500 et 1000 W, mais ces derniers ont présenté des valeurs significativement supérieures à celle de l'échantillon séché à 100 W. Ce résultat est probablement dû à la courte durée de séchage qui sont de $44,08 \pm 0,51$ et de $21,00 \pm 2,17$ min pour les puissances 500 et 1000 W, respectivement qui n'ont pas permis la dégradation des caroténoïdes.

Tels que l'on peut constater, les niveaux de puissances de micro-ondes utilisées ont donc une influence significative sur la teneur en caroténoïdes des échantillons séchés. Mais notre résultat ne concorde pas avec les résultats rapportés par **Zhao, An et al. (2014)** qui ont étudié l'effet de microonde sur les tranches de carottes.

IV.3.3.2. Teneur en caroténoïdes des poudres de carottes séchées par l'étuve

Les résultats obtenus pour les caroténoïdes totaux des extraits des carottes séchées par microonde sont présentés dans la figure 18.

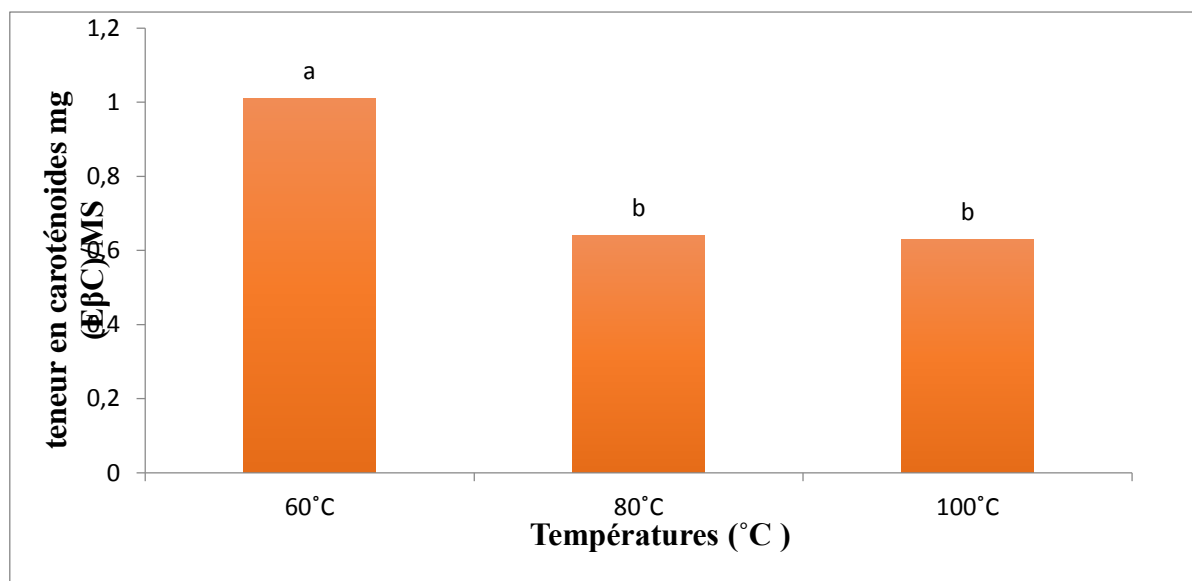


Figure 18 : Teneur en caroténoïdes des poudres de la carotte issues de séchage par l'étuve.

Les résultats du dosage des caroténoïdes des extraits des poudres de carotte séchées par étuve montrent à leur tour des concentrations variables suivant la variabilité de la température de séchage appliquée. Les teneurs obtenues ont été de l'ordre $1,01 \pm 0,03$; $0,64 \pm 0,02$ et $0,63 \pm 0,02$ mg/g MS pour les différentes températures 60 ;80 et 100°C, respectivement. Tels que l'on peut constater, la teneur la plus importante est obtenue à la température 60°C, et des teneurs plus faibles sont obtenues aux températures 80 et 100°C, cela peut être expliqué par le fait que les caroténoïdes sont dégradés par l'augmentation de la température (**Parada and Aguilera 2011**). L'analyse statistique de ces résultats a conduit à une absence de différence significative entre les teneurs en caroténoïdes des échantillons séchés à 80 et 100°C, mais ces derniers ont présenté des valeurs significativement inférieures à celle de l'échantillon séché à 60°C.

VI.3.3.3. Comparaison entre les deux procédés de séchage en terme de teneur en caroténoïdes

La comparaison entre les deux procédés de séchage en termes de teneur en caroténoïdes est illustrée dans le tableau suivant :

Tableau XI: Résultats de l'analyse statistique des caroténoïdes.

Procédés de séchage	Teneurs en caroténoïdes mg E β C/g MS)
microonde	
100W	0,54 \pm 0,03 ^{bC}
500W	0,66 \pm 0,01 ^{aB}
1000W	0,67 \pm 0,01 ^{aB}
Etuve	
60°C	1,01 \pm 0,03 ^{aA}
80°C	0,64 \pm 0,02 ^{bB}
100°C	0,63 \pm 0,02 ^{bB}

D'après les résultats présents dans le tableau, nous remarquons que l'analyse statistique n'a pas montré une différence significative entre les poudres séchées aux puissances ; 500 et 1000 W et aux températures 80 et 100 °C et qui présentaient des teneurs moyennes (0,63 à 0,67 mg E β C/g MS) mais ces derniers sont statistiquement différentes par rapport à la poudre séchée à 100W qui présente la teneur la plus faible (0,54mg E β C/g MS) et la température 60 °C qui présente la teneur la plus élevée (1,01mg E β C/g MS) aux autres températures et puissances .

La teneur la plus importante en caroténoïdes est obtenue avec la poudre séchée à la température 60 °C car comme cité précédemment , les caroténoïdes sont mieux préservés à faibles températures qu'à hautes températures.

Les teneurs en caroténoïdes obtenues à 500 et 1000 W sont comparables à celles obtenues avec les températures 80 et 100 °C, cela est probablement dû au fait que le temps de séchage impliqué pour ces deux puissances est court.

La teneur la plus faible est obtenue avec la poudre séchée à 100 W peut être liée directement en temps de séchage longue implique à cette puissance ; 376,67min.

Conclusion

Conclusion

La carotte est le légume le plus couramment utilisé par l'homme pour la nutrition. En raison de sa richesse en contenu vitaminique et minéral, et d'autres nutriments précieux.

Le séchage étant une opération unitaire de la technologie des industries agroalimentaires, il en existe plusieurs modes de séchage du plus lent au plus rapide.

Dans cet étude, deux procédés de séchage ; microonde (100 ;500 et 1000 W) et étuve (60, 80 et 100 °C) ont été comparé sur la base des résultats des cinétiques ; temps et vitesses de séchage. Les poudres obtenues après séchage ont été comparés sur la base de l'évaluation de leurs qualité physique ; rétrécissement et densité et de leurs qualité phytochimique ; dosage des polyphénols totaux et évaluation de leurs activités et le dosage des caroténoïdes.

Les résultats des cinétiques ont montré que la perte en masse de la carotte est plus rapide en appliquant le séchage innovant assisté par micro-onde par rapport à la méthode conventionnelle (l'étuve) ; pour la fortes puissances ; 500 et 1000 W, il a fallu seulement 44 et 21 min, respectivement pour stabiliser la masse de 90 g d'échantillon frais , par contre, le séchage à la plus haute température de l'étuve qui est de 100 °C, il a fallu 148,33 min pour stabiliser la même masse d'échantillon. Il est de même pour les vitesses moyennes ; pour les hauts niveaux de puissances 500 et 1000 W, les valeurs de la vitesse été de 19 et 45kg eau/kgMS.min).

La modélisation des données expérimentales, montrent que parmi les quartes modèles étudiés, le modèle de Page représente parfaitement le comportement de ce produit.

Concernant les résultats de l'évaluation de la qualité physique (rétrécissement et densité) . le retrait volumétrique montre une relation linéaire avec la teneur en humidité. Un retrait plus important été observé pour le séchage par étuve.

Alors que pour la densité, elle augmente à fur que l'humidité est faible. La poudre de 1000 W a été la plus dense.

Pour le dosage des PPT, le rendement le plus élevé est attribué à la poudre séchée par microonde à la puissance 500 W (4,81 mg EAG/g MS), suivi de la poudre séchée à 1000 W (4.64 mg EAG/g MS). Par contre, le séchage avec la méthode conventionnel à l'étuve, la teneur le plus élevée est attribué à la poudre séchée à la température 100°C (4,77mg EAG/g).

Concernant les résultats de l'évaluation de l'activité antioxydante par les tests anti radicalaires ; DPPH et ABTs, ont montré que les meilleures activités sont attribuées aux

Conclusion

poudres séchées à 500 et 1000 W dans le cas de séchage par microonde et à la poudre séchée à 100 °C. Ces deux tests ont montré une forte corrélation avec le contenu phénolique, voir des coefficients de corrélation de 0,998 et de 0.999 pour les tests au DPPH et ABTs, respectivement.

Quant aux résultats de dosage des caroténoïdes, la teneur la plus élevée est attribuée à la poudre séchée à la température 60 °C (1,011mg E β C /g de MS) et la teneur la plus faible est obtenue avec la poudre séchée à 100 W (0,63 mg E β C/g MS). Les poudres séchées aux microondes à 500 et à 1000 W et celles séchées à l'étuve à 80 et à 100°C contenaient des teneurs comparables sans constatation de différences significatives entre eux.

Cette étude nous a permis de mieux comprendre l'influence des deux procédés de séchage ; microonde et étuve sur la carotte et ses qualités physique et phytochimique.

A la lumière de cette investigation, il en ressort que le séchage par micro-onde est plus avantageux, d'une part ; en terme de réduction du temps de séchage et des vitesses de séchage importantes surtout en appliquant les hauts niveaux de puissances 500 et 1000 W. D'autre part en terme préservation de la qualité phytochimique ; voir les meilleurs teneurs en PPT et les meilleures activités qui sont toujours attribuées aux poudres séchées à 500 et à 1000 W. et ainsi que pour la qualité physique pour le rétrécissement et densité .

Toutefois, il serait souhaitable de compléter ce travail avec :

- Evaluation de la composition chimique complète des poudres séchées par le dosage des sucres, protéines ... ;
- Caractérisation des polyphénols totaux par HPLC ;
- Caractérisation des caroténoïdes par HPLC ;
- Evaluation de l'activité antioxydante des caroténoïdes ;
- Calcul de l'énergie consommée au cours des deux procédés de séchage
- Valorisation des poudres de carottes séchées à l'échelle industriel par l'essai de fabrication du jus de la carotte ou par son additionnement à d'autres poudre de légumes pour la fabrication du soupe industrielle..... ;

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Achat, S., V. Tomao, et al. (2012). "Direct enrichment of olive oil in oleuropein by ultrasound-assisted maceration at laboratory and pilot plant scale." Ultrason Sonochem **19**(4): 777-786.
- Akyıldız, A., S. Aksay, et al. (2004). "Determination of changes in some characteristics of persimmon during dehydration at different temperatures." Journal of Food Engineering **65**(1): 95-99.
- Al-Muhtaseb, A., W. McMinn, et al. (2004). Shrinkage, density and porosity variations during the convective drying of potato starch gel. 14th International Drying Symposium (IDS), São Paulo, Brazil.
- Alasalvar, C., J. M. Grigor, et al. (2001). "Comparison of volatiles, phenolics, sugars, antioxidant vitamins, and sensory quality of different colored carrot varieties." Journal of Agricultural and Food Chemistry **49**(3): 1410-1416.
- Alibas, I. (2007). "Microwave, air and combined microwave–air-drying parameters of pumpkin slices." LWT - Food Science and Technology **40**(8): 1445-1451.
- Alibas, I. (2007). "Microwave, air and combined microwave–air-drying parameters of pumpkin slices." LWT-food science and technology **40**(8): 1445-1451.
- Alireza, S., N. Mehdi, et al. (2005). "Cancer occurrence in Iran in 2002, an international perspective." Asian Pacific journal of cancer prevention **6**(3): 359.
- Amami, E., W. Khezami, et al. (2017). "Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on the convective drying of strawberry." Ultrason Sonochem **36**: 286-300.
- Amensour, M., E. Sendra, et al. (2010). "Antioxidant activity and total phenolic compounds of myrtle extracts Actividad antioxidante y contenido de compuestos fenólicos totales en extractos de myrtus." CyTA - Journal of Food **8**(2): 95-101.
- Arikan, M. F., Z. Ayhan, et al. (2011). "Drying Characteristics and Quality Parameters of Microwave-Dried Grated Carrots." Food and Bioprocess Technology **5**(8): 3217-3229.
- Arikan, M. F., Z. Ayhan, et al. (2012). "Drying characteristics and quality parameters of microwave-dried grated carrots." Food and Bioprocess Technology **5**(8): 3217-3229.
- Arslan, D. and M. Musa Özcan (2010). "Study the effect of sun, oven and microwave drying on quality of onion slices." LWT - Food Science and Technology **43**(7): 1121-1127.

Références bibliographiques

- Ayas, N., K. Messaoudi, et al. (2017). "Enrichissement de la margarine en caroténoïdes."
- Aydin, C. (2007). "Some engineering properties of peanut and kernel." Journal of Food Engineering **79**(3): 810-816.
- BONAZZI, C. and J.-J. BIMBENET (2003). "Séchage des produits alimentaires Principes." Techniques de l'ingénieur. Agroalimentaire **2**(F3000): F3000. 3001-F3000. 3014.
- Boubeghal, A., M. Benhammou, et al. (2007). "Etude numérique d'un séchoir solaire fonctionnant en convection naturelle." Revue des Energies Renouvelables ICRES-07, Tlemcen: 315-320.
- Bouraoui, M., P. Richard, et al. (1994). "Microwave and convective drying of potato slices." Journal of Food Process Engineering **17**(3): 353-363.
- Bozin, B., N. Mimica-Dukic, et al. (2008). "Phenolics as antioxidants in garlic (*Allium sativum* L., Alliaceae)." Food Chemistry **111**(4): 925-929.
- Brothwell, D. R. and P. Brothwell (1998). Food in antiquity: a survey of the diet of early peoples, JHU Press.
- Caparino, O. A., J. Tang, et al. (2012). "Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (Philippine 'Carabao' var.) powder." Journal of Food Engineering **111**(1): 135-148.
- Carrot, W. (2011). "Carrot: history and iconography." Chronica **51**(2): 13.
- Changrue, V. (2006). Hybrid (osmotic, microwave-vacuum) drying of strawberries and carrots, McGill University Montreal.
- Cheftel, C., J. Cuq, et al. (1976). "Influence de procedes technologiques sur la composition et la valeur nutritionnelle d'aliments proteiques." Revue française des corps gras.
- Chemat, F., V. Tomao, et al. (2008). "Ultrasound-assisted extraction in food analysis." Handbook of food analysis instruments: 85-103.
- CHEN, C. W. and C. T. HO (1995). "Antioxidant properties of polyphenols extracted from green and black teas." Journal of food lipids **2**(1): 35-46.
- Cowan, M. M. (1999). "Plant products as antimicrobial agents." Clinical microbiology reviews **12**(4): 564-582.

Références bibliographiques

- Dadalı, G., D. Kılıç Apar, et al. (2007). "Microwave Drying Kinetics of Okra." Drying Technology **25**(5): 917-924.
- Dahmoune, F., L. Boulekbache, et al. (2013). "Valorization of Citrus limon residues for the recovery of antioxidants: Evaluation and optimization of microwave and ultrasound application to solvent extraction." Industrial Crops and Products **50**: 77-87.
- Darvishi, H., A. R. Asl, et al. (2014). "Study of the drying kinetics of pepper." Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences **13**(2): 130-138.
- Dewanto, V., X. Wu, et al. (2002). "Thermal processing enhances the nutritional value of tomatoes by increasing total antioxidant activity." Journal of Agricultural and Food Chemistry **50**(10): 3010-3014.
- Díaz, E. L., L. Giannuzzi, et al. (2009). "Apple pectic gel produced by dehydration." Food and Bioprocess Technology **2**(2): 194-207.
- Dikbasan, T. (2007). Determination of effective parameters for drying of apples, Izmir Institute of Technology.
- Downie, S. R. and D. S. Katz-Downie (1996). "A molecular phylogeny of Apiaceae subfamily Apioideae: evidence from nuclear ribosomal DNA internal transcribed spacer sequences." American journal of botany **83**(2): 234-251.
- Doymaz, I. (2007). "The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices." Journal of Food Engineering **79**(1): 243-248.
- Doymaz, I. and M. Pala (2002). "The effects of dipping pretreatments on air-drying rates of the seedless grapes." Journal of Food Engineering **52**(4): 413-417.
- Drouzas, A., E. Tsami, et al. (1999). "Microwave/vacuum drying of model fruit gels." Journal of Food Engineering **39**(2): 117-122.
- Duh, P.-D., Y.-Y. Tu, et al. (1999). "Antioxidant activity of water extract of Harnng Jyur (*Chrysanthemum morifolium* Ramat)." LWT-Food Science and Technology **32**(5): 269-277.
- Dutta, D., U. R. Chaudhuri, et al. (2005). "Structure, health benefits, antioxidant property and processing and storage of carotenoids." African Journal of Biotechnology **4**(13).

Références bibliographiques

- Ellong, E. N., C. Billard, et al. (2015). "Polyphenols, Carotenoids, Vitamin C Content in Tropical Fruits and Vegetables and Impact of Processing Methods." Food and Nutrition Sciences **06**(03): 299-313.
- 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.
- Galgali, G., C. Ramesh, et al. (2001). "A rheological study on the kinetics of hybrid formation in polypropylene nanocomposites." Macromolecules **34**(4): 852-858.
- Georgé, S., P. Brat, et al. (2005). "Rapid determination of polyphenols and vitamin C in plant-derived products." Journal of Agricultural and Food Chemistry **53**(5): 1370-1373.
- Ghanem, N., D. Mihoubi, et al. (2012). "Microwave dehydration of three citrus peel cultivars: Effect on water and oil retention capacities, color, shrinkage and total phenols content." Industrial Crops and Products **40**: 167-177.
- Guiné, R. P. F., F. Henriques, et al. (2012). "Mass transfer coefficients for the drying of pumpkin (*Cucurbita moschata*) and dried product quality." Food and Bioprocess Technology **5**(1): 176-183.
- Hatano, T., R. Edamatsu, et al. (1989). "Effects of the interaction of tannins with co-existing substances. VI.: effects of tannins and related polyphenols on superoxide anion radical, and on 1, 1-Diphenyl-2-picrylhydrazyl radical." Chemical and Pharmaceutical Bulletin **37**(8): 2016-2021.
- Inchuen, S., W. Narkrugs, et al. (2008). "Microwave and hot-air drying of Thai red curry paste." Maejo International Journal of Science and Technology **1**: 38-49.
- Katekawa, M. and M. Silva (2007). "Drying rates in shrinking medium: case study of banana." Brazilian Journal of Chemical Engineering **24**(4): 561-569.
- Klimczak, I., M. Małeczka, et al. (2007). "Effect of storage on the content of polyphenols, vitamin C and the antioxidant activity of orange juices." Journal of Food Composition and Analysis **20**(3-4): 313-322.
- Kone, K. (2011). Amélioration de la qualité de la tomate séchée par microondes assistés par air chaud avec pilotage de la puissance spécifique, AgroParisTech.
- Krokida, M. K., V. Karathanos, et al. (2003). "Drying kinetics of some vegetables." Journal of Food Engineering **59**(4): 391-403.

Références bibliographiques

- Kumar, Y., S. Tiwari, et al. (2015). "Drying: an excellent method for food preservation." International Journal of Engineering Studies and Technical Approach **1**(8): 1-17.
- Lahmari, N., D. Fahloul, et al. (2012). "Influence des méthodes de séchage sur la qualité des tomates séchées (variété Zahra)." Revue des Energies Renouvelables **15**(2): 285-295.
- Lecomte, M. (2013). Analyse des mécanismes de défense de la carotte (Daucus carota) face au champignon pathogène Alternaria dauci, responsable de l'alternariose ou brûlure foliaire, Université d'Angers.
- Lewicki, P. P. (1998). "Effect of pre-drying treatment, drying and rehydration on plant tissue properties: A review." International Journal of Food Properties **1**(1): 1-22.
- Li, Z. (2004). Design of a microcontroller-based, power control system for microwave drying, McGill University.
- Li, Z., G. Raghavan, et al. (2011). "Drying rate control in the middle stage of microwave drying." Journal of Food Engineering **104**(2): 234-238.
- Li, Z., G. S. V. Raghavan, et al. (2010). "Temperature and power control in microwave drying." Journal of Food Engineering **97**(4): 478-483.
- Lien, E. J., S. Ren, et al. (1999). "Quantitative structure-activity relationship analysis of phenolic antioxidants." Free Radical Biology and Medicine **26**(3-4): 285-294.
- Macheix, J.-J., A. Fleuriet, et al. (2005). Les composés phénoliques des végétaux: un exemple de métabolites secondaires d'importance économique, PPUR presses polytechniques.
- Maiani, G., M. J. Periago Castón, et al. (2009). "Carotenoids: actual knowledge on food sources, intakes, stability and bioavailability and their protective role in humans." Molecular nutrition & food research **53**(S2): S194-S218.
- Marinova, D., F. Ribarova, et al. (2005). "Total phenolics and total flavonoids in Bulgarian fruits and vegetables." Journal of the university of chemical technology and metallurgy **40**(3): 255-260.
- Marousis, S. and G. Saravacos (1990). "Density and porosity in drying starch materials." Journal of Food Science **55**(5): 1367-1372.
- Maskan, M. (2001). "Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying." Journal of Food Engineering **48**(2): 177-182.

Références bibliographiques

- Maskan, M. (2001). "Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying." Journal of Food Engineering **48**(2): 169-175.
- Mayor, L. and A. M. Sereno (2004). "Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review." Journal of Food Engineering **61**(3): 373-386.
- mondiale de la Santé, O. (2014). "Fruits et légumes pour la santé: Rapport de l'atelier conjoint FAO."
- Mulet, A., A. Berna, et al. (1989). "Drying of Carrots. I. Drying Models." Drying Technology **7**(3): 537-557.
- Murkovic, M., U. Mülleder, et al. (2002). "Carotenoid content in different varieties of pumpkins." Journal of Food Composition and Analysis **15**(6): 633-638.
- Nahimana, H. and M. Zhang (2011). "Shrinkage and color change during microwave vacuum drying of carrot." Drying Technology **29**(7): 836-847.
- Nguyen, T. H. (2015). Étude expérimentale et modélisation du procédé de séchage des végétaux, Université de Bretagne Sud.
- Northolt, M., G.-J. van der Burgt, et al. (2004). "Parameters for Carrot Quality: and the development of the Inner Quality concept."
- Parada, J. and J. M. Aguilera (2011). "Microstructure, mechanical properties, and starch digestibility of a cooked dough made with potato starch and wheat gluten." LWT-Food Science and Technology **44**(8): 1739-1744.
- Rao, A. V. and L. G. Rao (2007). "Carotenoids and human health." Pharmacol Res **55**(3): 207-216.
- Re, R., N. Pellegrini, et al. (1999). "Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay." Free Radical Biology and Medicine **26**(9-10): 1231-1237.
- Rothwell, J. A., J. Perez-Jimenez, et al. (2013). "Phenol-Explorer 3.0: a major update of the Phenol-Explorer database to incorporate data on the effects of food processing on polyphenol content." Database **2013**.
- Ruiz-López, I., R. Castillo-Zamudio, et al. (2010). "Mass transfer modeling during osmotic dehydration of hexahedral pineapple slices in limited volume solutions." Food and Bioprocess Technology **3**(3): 427-433.

Références bibliographiques

- Sacilik, K. (2007). "Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (*Cucurbita pepo* L.)." Journal of Food Engineering **79**(1): 23-30.
- Schubert, H. (1987). "Food particle technology. Part I: Properties of particles and particulate food systems." Journal of Food Engineering **6**(1): 1-32.
- Sharma, G. P. and S. Prasad (2006). "Optimization of process parameters for microwave drying of garlic cloves." Journal of Food Engineering **75**(4): 441-446.
- Souci, S. W., H. Scherz, et al. (1994). Food composition and nutrition tables, Medpharm Scientific Publishers.
- Spooner, D., P. Rojas, et al. (2013). "Molecular Phylogeny of *Daucus* (Apiaceae)." Systematic Botany **38**(3): 850-857.
- Sulaeman, A., L. Keeler, et al. (2001). "Carotenoid content and physicochemical and sensory characteristics of carrot chips deep-fried in different oils at several temperatures." Journal of Food Science **66**(9): 1257-1264.
- Sumnu, G., E. Turabi, et al. (2005). "Drying of carrots in microwave and halogen lamp–microwave combination ovens." LWT - Food Science and Technology **38**(5): 549-553.
- Suvarnakuta, P., S. Devahastin, et al. (2005). "Drying kinetics and β -carotene degradation in carrot undergoing different drying processes." Journal of Food Science **70**(8): s520-s526.
- Tulasidas, T. N., G. S. V. Raghavan, et al. (2007). "Microwave Drying of Grapes in a Single Mode Cavity at 2450 Mhz - i: Drying Kinetics." Drying Technology **13**(8-9): 1949-1971.
- Turhan, M., K. N. Turhan, et al. (1997). "Drying Kinetics of Red Pepper." Journal of Food Processing and Preservation **21**(3): 209-223.
- Wang, N. and J. Brennan (1995). "Changes in structure, density and porosity of potato during dehydration." Journal of Food Engineering **24**(1): 61-76.
- Zhang, D. and Y. Hamauzu (2004). "Phenolic compounds and their antioxidant properties in different tissues of carrots (*Daucus carota* L.)." Journal of Food Agriculture and Environment **2**: 95-100.
- Zhao, D., K. An, et al. (2014). "Two-Stage Intermittent Microwave Coupled with Hot-Air Drying of Carrot Slices: Drying Kinetics and Physical Quality." Food and Bioprocess Technology **7**(8): 2308-2318.

Références bibliographiques

Zielinska, M., D. Zielinska, et al. (2017). "The Effect of Microwave-Vacuum Pretreatment on the Drying Kinetics, Color and the Content of Bioactive Compounds in Osmo-Microwave-Vacuum Dried Cranberries (*Vaccinium macrocarpon*)."
Food and Bioprocess Technology **11**(3): 585-602.

Annexes

Annexe I :Matériels utilisés

I-Appareillage

- ❖ Balance de précision RADWAG WAS 600/C/2
- ❖ Broyeur électrique
- ❖ Dessiccateur RADWAG MAC 50/NP
- ❖ Etuve ventilé
- ❖ Micro-onde maxi power
- ❖ Spectrophotomètre UV-Vis SRECTROSCAN50
- ❖ Vortex « classic advenced »
- ❖ Centrifugeuse
- ❖ Bain marie
- ❖ Sanicateur
- ❖ Bain marin

II. Produits chimiques

- ❖ Acétone (BIOCHEM Chemopharma)
- ❖ Carbonate de sodium (Na_2CO_3) (SIGMA-ALDRICH)
- ❖ Folin-ciocalteu (PROLABO)
- ❖ Méthanol (SCHARLAU)
- ❖ DPPH (SIGMA-ALDRICH)
- ❖ ABTS
- ❖ Hexane
- ❖ Ethanol

Annexes II : Courbes d'étalonnage

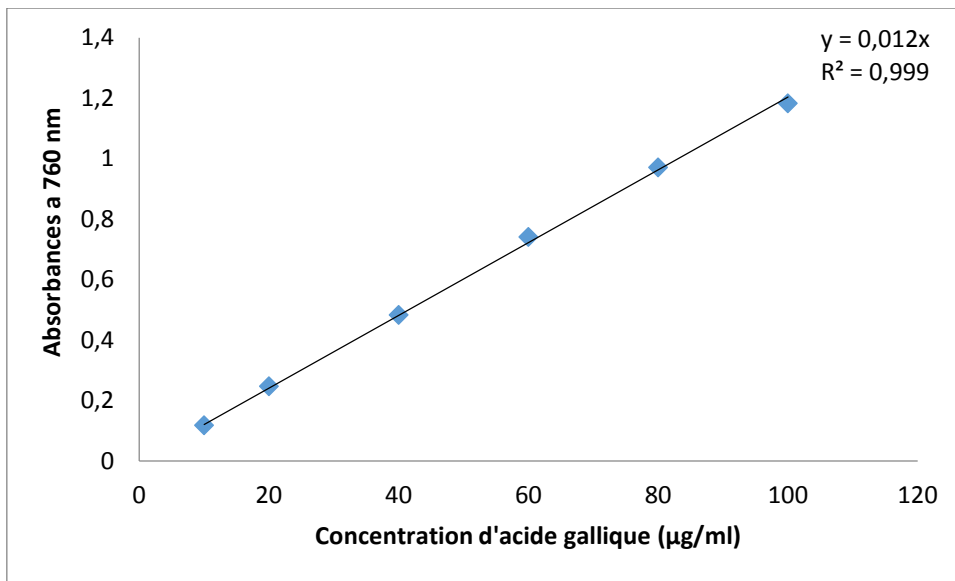


Figure 1: Courbe d'étalonnage de l'acide gallique.

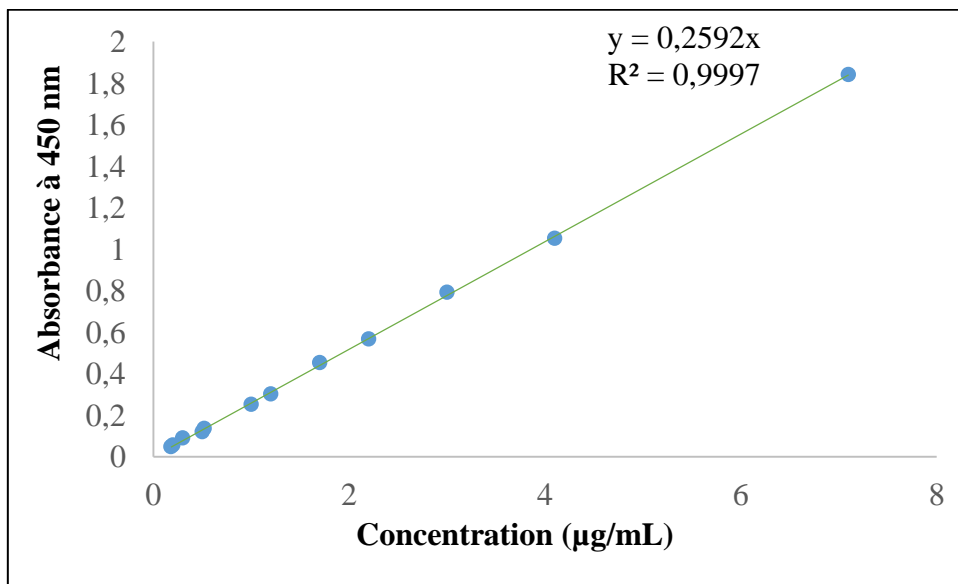


Figure 2: Courbe d'étalonnage des caroténoïdes (β-carotène).

Résumé

L'objectif de ce travail est la comparaison de deux méthodes de séchage : micro-onde (100, 500 et 1000W) et étuve (60, 80 et 100°C) de la carotte (*Daucus carota* L.) en se basant sur les résultats cinétiques (temps et vitesse de séchage) et l'évaluation des qualités physique et phytochimique (teneur en humidité, densité, rétrécissement, détermination des polyphénols et leur activité anti-oxydante et des caroténoïdes). Le microonde a réduit significativement les temps de séchage comparativement au séchage conventionnel à l'étuve surtout en appliquant les hauts niveaux de puissances (500 et 1000W). L'évaluation de la qualité physique ; densité et rétrécissement a montré leur dépendance à la teneur en humidité. La meilleure valeur de densité été obtenue pour la poudre séchée à 100W, et le retrait volumétrique présentait une relation linéaire avec le taux d'humidité et la poudre la moins rétrécit est toujours celle séchée à 100W. La détermination des composants bioactifs, particulièrement ; les polyphénols a montré la richesse des poudres séchées à des hauts niveaux de puissances (500 et 1000W) et de températures (100°C), les résultats de la détermination de l'activité anti-oxydante par les tests ; DPPH et ABTS ont conduit aux mêmes constatations. Le dosage des caroténoïdes a montré que la poudre la plus riche est la poudre séchée à 60°C (1.01mg E β C/g MS), et que les températures de séchage élevées les dégradent. Tandis que ; le contraire à été constaté dans le cas de microonde c'est-à-dire que les poudres séchées aux hauts niveaux de puissances contiennent plus de caroténoïdes.

Mots clés :

Cinétique de séchage ; Microonde ; Etuve ; Qualité physique ; Qualité phytochimique.

Abstract

The objective of this work is to compare two drying methods: microwave (100, 500 and 1000W) and oven (60, 80 and 100°C) of the carrot (*Daucus carota* L.) based on kinetic results (drying time and speed) and the evaluation of physical and phytochemical qualities (moisture content, density, shrinkage, determination of polyphenols and their antioxidant activity and carotenoids). The microwave significantly reduced drying times compared to conventional oven drying, especially by applying high power levels (500 and 1000W). The assessment of physical quality; density and shrinkage showed their dependence on moisture content. The best density value was obtained for the powder dried at 100W, and the volumetric shrinkage was linearly related to the moisture content and the powder that is the least shrunk is always the powder dried at 100W. The determination of bioactive components, particularly; polyphenols showed the richness of powders dried at high power levels (500 and 1000W) and temperatures (100°C), the results of the determination of antioxidant activity by tests; DPPH and ABTS led to the same findings. The carotenoid assay showed that the richest powder is the powder dried at 60°C (1.01mg E β C/g MS). and that washed drying temperatures degrade them. While the opposite has been found in the case of microwaves, i.e. powders dried at high power levels contain more carotenoids.

Keywords :

Drying kinetics ; Microwave ; Oven ; Physical quality ; Phytochemical quality.