République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique
Université A. MIRA – Bejaia

Faculté des Sciences et de la Nature et de la Vie
Département des Sciences alimentaires
Filière : Science des aliments
Option : Biotechnologie, Agro-ressources, Aliment et Nutrition

Réf :……

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

MASTER

Thème

Séchage de la carotte par micro-onde *versus* conventionnel. Etude phénoménologique

Présenté par :
KACHBI Chanez & HOUCHAT Celia

Soutenu le : **16 Juin 2015**
Devant le jury composé de :

M^{me} BOULEKBACHE L.	MCA	President
Mr. MADANI K.	Professeur	Promoteur
Mr. DAHMOUNE F.	Docteur	Co-promoteur
M^{me} GEUMGHAR H.	MAA	Examinatrice
M^{me} BOUCHARA N.	Doctorante	Invitée

Année universitaire : 2014 / 2015

Remerciement

Tout d'abord, on remercie Dieu, le Généreux qui a enseigné à l'homme ce qu'il ne savait pas et aussi de nous avoir donné la force afin d'accomplir ce modeste travail.

Au terme de ce travail passé au laboratoire B.B.B.S, le moment est venu de remercier tous ceux qui nous ont, à divers titres, aidé.

Nous avons l'honneur de formuler notre gratitude et notre profonde reconnaissance à l'égard de ***MonsieurMADANI K.*** *Notre promoteur et notre Co-promoteur* ***MonsieurDAHMOUNE F.****pour leurs précieuses aides, leursOrientations et le temps qu'ils nous ont accordé pour notre encadrement*.

Aussi, ontvoudrais sincèrement exprimer notre profonde gratitude pour ***M^{me} BOUCHARA N.*** *pour son aide précieuse notamment dans le suivi pratique et théorique. On la remercie également pour ces conseils et ses encouragements incessants. Son sens des valeurs humaines et son esprit scientifique nous ont conduits à la réussite de ce travail.*

On tient à remercier vivement ***M^{me} BOULEKBACHE L****. qui nous fait l'immense honneur de présider le jury.Ainsi* ***que M^{me} GUEMEGHAR H.****pour l'honneur qu'elle nous a accordé en acceptant d'évaluer ce modeste travail.*

*Nous remercions aussi Tout les membres du laboratoire B.B.B.S :****Mr MOUSSI ; HOUCINE ; SOUADE ; AKILA ; MENANA ; NAIMA ; AMINA; LINDA ;...***

Nous remercions toutes les personnes qui ont participé de près ou deLoin à la réalisation de ce Travail.

Qu'Allah le clément et miséricordieux vous accorde son aide dans tous vosprojets et toute votre vie quotidienne.

Merci ;

Celia&Chanez

Dédicaces

À ceux qui m'ont tout donné sans rien en retour

À ceux qui m'ont encouragé et soutenu dans mes moments les plus

Difficiles.

Et ceux à qui je dois tant

À mes très chers parents

À ma sœur

À toute la famille Cousin et cousines oncles et tontes

À ceux qui m'ont soutenu de loin ou de près

À tous mes amis qui me connaissent sans exception ;

Samia; Lamia; Chanez; Nawel; Yasmine; Merieme; Tahar; Yamina; Selma; Kamilia; Mouloude; Lamine; Malek ; Nadjime ; Chafaa

À ma camarade Chanez et toute sa famille ;

À toute la promotion Science des aliments : 2014/2015

Je présente ce travail.

Celia

Dédicaces

À ceux qui m'ont tout donné sans rien en retour

À ceux qui m'ont encouragé et soutenu dans mes moments les plus

Difficiles.

À mes très chers parents

À ma sœur Wahiba, son mari et leurs petits-enfants Asma et Rayan

À Mes frères Salim, Doudine, Yacine et Khaled

À toute la famille, oncles et tantes, cousines et cousins

À ma chère Binôme Celia ainsi que toute sa famille

À tous mes amis qui me connaissent sans exception

À toute la promotion Science des aliments : 2014/2015

À tous ceux qui me sont chers

Chanez

Liste des Figures

Figure 1: Photographie d'une Coupe transversale et schéma descriptif du Daucus carota...4

Figure 2 : Classification des composés phénoliques. 6

Figure 3 : Structure des quatre caroténoïdes majeurs de l'alimentation humaine..... 7

Figure 4: Structure générale des flavonoïdes 8

Figure 5: Structure des principaux anthocyanes..... 8

Figure 7: Photographie de tranches de carotte 16

Figure 8: Photographie du micro-onde (A) et étuve (B) 17

Figure 9: Photographie du broyer électrique (A), tamiseur automatique (B), poudre de Carotte (C) 18

Figure 10: Prototype utilisé pour l'extraction par solvant assistée par micro-onde..... 19

Figure 11: Protocole de dosage des polyphénols totaux 20

Figure 12: Protocole de dosage des flavonoïdes 21

Figure 13: Protocole de détermination de l'activité antioxydant au radical ABTS• 22

Figure 14: Protocole utilisé pour la détermination de l'activité antioxydant par le radical DPPH 23

Figure 15: Protocole utilisé pour l'extraction et le dosage des caroténoïdes 24

Figure 16: Photographie d'un colorimètre 25

Figure 17: Photographie de DRX (Diffraction aux Rayons X)..... 26

Figure 18: Evolution de la perte de masse en fonction du couple temps-puissance de séchage par micro-onde. 27

Figure 19: Evolution de la perte de masse en fonction du couple temps-température de séchage à l'étuve. 28

Figure 20: Teneur en polyphénols totaux des extraits de carotte séchée au..... 30

Figure 21: Teneur en polyphénols totaux des extraits de carotte séchée à l'étuve..... 31

Figure 22: Teneur en flavonoïdes des extraits de carotte séchée au micro-onde 33

Figure 23: Teneur en flavonoïdes des extraits de carotte séchée à l'étuve. 34

Figure 24: Teneur en anthocyanes des extraits de carotte séchée au micro-onde. 35

Figure 25: Teneur en anthocyanes des extraits de carotte séchée à l'étuve 36

Figure 26: Pourcentage d'inhibition du radical ABTS des différents extraits de la carotte séchés au micro-onde..... 37

Figure 27: Pourcentage d'inhibition du radical ABTS des différents extraits de la carotte séchés à l'étuve. 38

Figure 28: Pourcentage d'inhibition du radical DPPH des différents extraits de la carotte séchée au micro-onde. 39

Figure 29: Pourcentage d'inhibition du radical DPPH des différents extraits de la carotte séchée à l'étuve. 40

Figure 30: Composition minérale de la poudre de carotte séchée au micro-onde..... 43

Figure 31: Composition minérale de la poudre de carotte séchée à l'étuve. 44

Liste des tableaux

Tableau I: Composition chimique de la carotte 5

Tableau II: Taux d'humidité et l'activité de l'eau des différentes poudres de la carotte séchée (à l'étuve et aux micro-ondes). ..... .29

Tableau III: Indice des PPT obtenu par analyse spectrale..... …32

Tableau IV: Teneur moyenne et pertes en caroténoïdes des extraits obtenus 41

Tableau V : Valeurs des trois paramètres de couleur obtenus ……42

Liste des Abréviations

ANOVA : Analyse de la Variance à un seul critère de classification

Abs: absorbance

ABTS: Acide 2 ,2'azinobis-3-ethilbenthiazoline-6-silfonic

ANC : Anthocyanes

AW : Activité de l'eau

DRX : Diffraction au rayon X

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

EqAG : Equivalent milligramme d'acide gallique

EqR : Equivalent milligramme de rutine

Eq-Cya-3-Glu : Equivalent milligramme cyanidine-3-glucoside

ES : Extrait sec

FAO : Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

FD : Facteur de dilution

IPP : Indice de Polyphénols tTotaux

MO : Micro-onde

MS : Matière Sèche

TH : Taux d'humidité

PIA : Produits Alimentaires Intermédiaires

PPT : Polyphénols Totaux

PM : Poid Moléculaire

W : Watt

Table des matières

Liste des figures.

Liste des tableaux.

Liste des abréviations.

Introduction……..1

Etude bibliographique

Chapitre I : Généralités sur la carotte

I.1. Description et identification…….3

I.2. Origine……..4

I.3. Classification botanique……...4

I.4. Composition chimique…….5

I.5. Différents anti-oxydants de la carotte……..5

I.6. Production de la carotte……8

I.7. Utilisation de la carotte…….9

Chapitre II : Généralités sur le séchage

II.1. Objectifs du séchage……..10

II.2. Principe du séchage……...10

II. 3. Méthodes du séchage……11

II. 3. 1. Séchage par entrainement……....11

II. 3. 2. Séchage par ébullition……....12

II. 3. 3. Séchege à l'air libre……12

II.3.4. Séchage par micro-onde……12

II.3.5. Séchage à l'étuve……...13

II.4. Intérêts du séchage des fruits est légumes……14

Etude expérimentale

Chapitre III : Matériels et méthodes

III.1. Appariellage……15

III.2. Produits chimiques……...15

III.3. Matériels végetal……..16

III.3.1. Description de la variété……....16

III.3.2. la collecte…….....16

III.4. Préparation et Séchage de matériel végetal……..16

III.4.1.Préparation de biomasse récoltée……..16

III.5. Broyage et tamissage……...17

III.6. Etude phénoménologique des poudres séchées…….....18

III.6.1. Extraction des composés phénoliques par solvant assistée par micro-onde……..18

III.6.2. Dosage des Polyphénols……....19

III.6.3. Dosage des Flavonoïdes……..21

III.6.4. Dosage des Anthocyanes……21

III.6.5. Détermination de l'activité antioxydante ……..22

III.6.6. Extraction et dosage des caroténoïdes……...24

III.6.7. Evaluation des paramètres de couleur……25

III.6.8. Caractérisation des minéraux…….....26

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1. Cinétique du séchage……...27

IV.1. 1. Cinétique du séchage par micro-onde de la carotte (*Daucus carota*)……27

IV.1.2. Cinétique du séchage à l'étuve ventilé de la carotte (*Daucus carota*)…….28

IV.2. Détermination du taux d'humidité et l'activité d'eau (Aw) des poudres séchées de la carotte……29

IV.3. Résultats phénoménologiques des poudres séchés……..30

IV.3.1. Contenance en composés phénoliques des extraits des poudres de la carotte séchée…….. ….30

IV.3.2. Contenance en flavonoïdes des extraits des poudres de la carotte séchée 33

IV.3.3. Contenance en anthocyanes des extraits des poudres de la carotte séchée…….34

IV.3.4. Activité anti-oxydante des extraits de poudres de carotte séchée……...36

IV.3.5. Contenance en caroténoïdes des extraits des poudres de la carotte séchée et de la carotte fraiche……40

IV.3.6. Evolution des paramètres de couleur…….....42

IV.3.7. Composition minérales des extraits des poudres de la carotte séchée…….43

Conclusion……...46

Références bibliographiques.

Annexes.

Résumé.

Introduction

Les légumes sont une partie importante de notre alimentation ils fournissent non seulement la composante majeure de fibres alimentaire de notre nourriture, mais aussi une gamme de micronutriments y compris les minéraux, vitamines et les composés antioxydants tels que les caroténoïdes et les polyphénols.

La valeur nutritionnelle des fruits et légumes est souvent associé à leur capacité antioxydante**(Chu et *al,* 2002; Vinson et *al,* 1998).**

La carotte est le légume racine le plus consommé dans le monde. Sa production mondiale est en constante progression.De plus en plus son intérêt est porté aux composés nutraceutiques de la racine, c'est-à-direaux composés pouvant être bénéfiques pour la santé. Ainsi que, la carotte représente un alimentintéressant pour sa teneur en composés antioxydants, principalement les anthocyanes ou l'acide chlorogénique mais aussi les caroténoïdes **(Sun et *al,* 2009)**. La forte teneur encaroténoïdes, notamment le β-carotène, est très intéressante, car ce β-carotène ou provitamine A, sera transformé par le métabolisme humain en vitamine A.

Divers méthodes de transformation des fruits et légumes ont été adoptées pour une meilleure conservation de ces derniers parmi ces méthodes, le séchage (à l'aire libre, à l'étuve, ou microonde) est l'une des formes les plus anciennes de la méthode de conservation des aliments.

Le séchage des produits agricoles permet de prolonger leur durée de conservation et les rendre disponible en hors saison.

Dans ce travail, nous étudions le processus de séchage assisté par Micro-onde et étuve ventilée de la carotte dans le butde contribuer à la compréhension du séchage des légumes-racinaires. Ce mémoire est doncstructuré en différentes parties dont :

Lapremièreest consacrée à un bref rappel bibliographique sur les recherches effectuées sur la carotte, les différentes variétés, la culture ainsi que sa production mondiale et nationale. En outre, dans cette partie nous avons évoqué également la théorie du séchage.

La deuxième partie traite :

- l'étude des cinétiques de séchages, et leur évolution au cours du temps avec différentes températures à l'étuve et différentes puissances au micro-onde ;
- l'étude phytochimiques des poudres récupérées après le procédé du séchage (à l'étuve et au microonde) de la carotte violette ;
- On termine par l'évaluation de leur activité antioxydante et caractérisation minéralogique des poudres récupérées.

I. Généralité sur La carotte (*Daucus carota*)

I.1 Description et identification

La carotte (*Daucus carota* L.) est une plante bisannuelle de climats tempérés, appartenant à la famille des Apiacées (*Apiaceae*), anciennement appelée famille des Ombellifères. Cette vaste et complexe famille comprend environ 445 genres et 3 700 espèces **(Downie et Katz-Downie, 1996).** Les relations phylogénétiques établies anciennement sur la base de données morpho-anatomiques ont été plusieurs fois remaniées grâce à l'utilisation de nouveaux types de données issues de la biologie moléculaire **(Le Clerc, 2001).**

Le genre *Daucus* comprend 22 espèces, parmi lesquelles *Daucus carota* est la plus répandue **(Reduron, 2007).** *Daucus carota* est une espèce indigène, commune en Europe. On la trouve surtout dans des zones incultes, des prairies sèches au sol sableux ou caillouteux, du littoral jusqu'à 1 500 m d'altitude. L'aire de répartition de *D. carota* comprend les régions européennes, périméditerranénnes et se prolonge à l'Est jusqu'aux portes de l'Himalaya **(Reduron, 2007).**

La taxonomie de l'espèce *Daucus carota* est assez complexe, on distingue deux sous-groupes infra-spécifiques ou agrégats, construits sur la base de caractères morphologiques :

- *D. carota* subsp. agg. *carota,* regroupe des plantes à port élancé et dressé, elles sont maritimes ou situées à l'intérieur des terres **(Reduron, 2007).**
- *D. carota* subsp. agg. *gummifer,* comprend des plantes à port trapu, aux feuilles plus épaisses, essentiellement présentes sur le littoral **(Reduron, 2007).**

L'agrégat *gummifer* comprend sept sous-espèces, tandis que l'agrégat *carota* en comprend six dont la sous-espèce *sativus* regroupant l'ensemble des carottes cultivées **(Reduron, 2007).** Au sein de cette sous-espèce *sativus*, on distingue encore deux sous-ensembles ou variétés au sens botanique **(Small, 1978 ; Reduron, 2007)** :

- les carottes à anthocyanes ou carottes dites de l'Est (*D. carota* subsp. *sativus* var.*atrorubens*).
- les carottes à carotènes ou carottes dites de l'Ouest (*D. carota* subsp. *sativus* var. *sativus*).

La carotte orange est le type largement dominant dans nos habitudes de consommation, mais d'autres couleurs existent. Ces différences de couleur s'expliquent toutes par des différences de teneur en caroténoïdes, hormis la carotte pourpre dont la couleur est due à la présence d'anthocyanes. **(Clotault et *al*, 2008 ; Clotault, 2009).**

I.2 Origine

Les premières carottes, qui étaient blanches, pourpres, et jaunes, ont été cultivées en Afghanistan et puis apportées à la zone Méditerranéenne. Les carottes orange d'aujourd'hui descendent des carottes Hollandais-multipliées et ont été développées aux Etats-Unis depuis des époques coloniales. La Californie produit environ 60 % de la récolte des Etats-Unis, dont 25 % entre dans la production des carottes mini-épluchées.**(Dalton, 2002).**

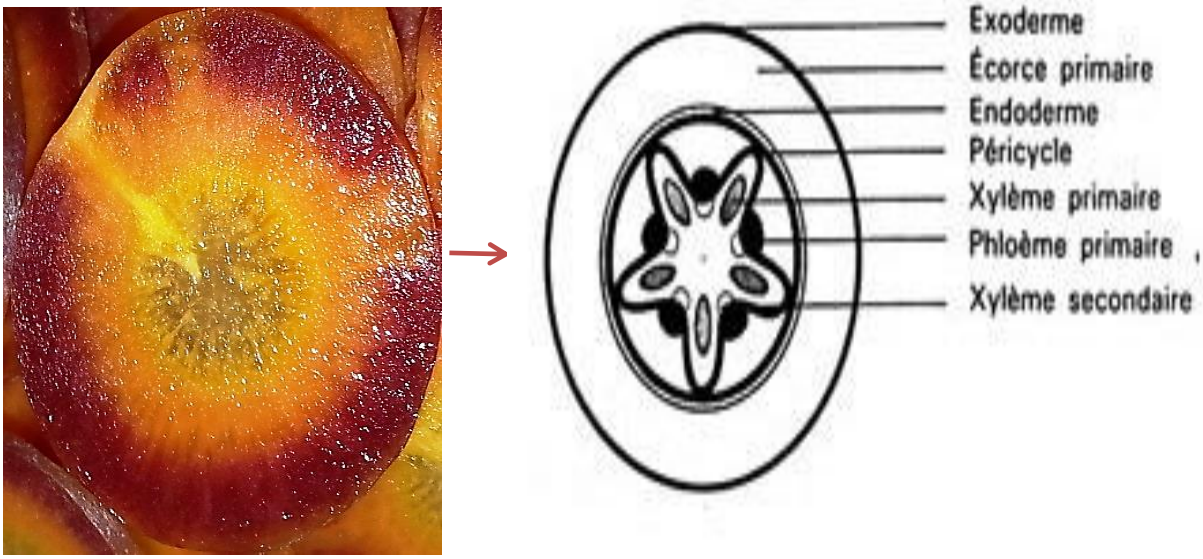


Figure 1.photographie d'une Coupe transversale **(prise par l'auteur)** et schéma descriptif du *Daucus carota*.

I.3 Classification botanique

Ordre : Apiales

Famille : Apiaceae

Genre : Daucus

Espèce : Daucus carota

Sous-Espèce : Daucus carota subsp. Sativus

I.4 Composition chimique

Le Tableau I présente la composition chimique moyenne de La carotte.

Tableau I. Composition chimique de la carotte

Constituants	Quantité	Références
Eau	**80-90 g**	**(Fokone, Edoun et *al*, 2013)**
Glucides	**6.6 g**	**(Fokone, Edoun et *al*, 2013)**
Protéines	**0.98 g**	**(Fokone, Edoun et *al*, 2013)**
Lipides	**0.3 g**	**(Fokone, Edoun et al, 2013)**
Caroténoïdes	**4350-8840µg**	**(Maiani et *al*, 2009)**
Flavonoïdes	**_**	
Anthocyanes	**_**	
Acide ascorbique	**4 mg**	**(Maiani et *al*, 2009)**
Cendres	**0.78 g**	**(Fokone, Edoun et *al*, 2013)**

I.5 Différents antioxydants de la carotte

Les carottes sont la source principale de la provitamine A, la vitamine C et le β-carotene, ainsi que de composés phénoliques totaux détectés dans différents tissus de la carotte.

Les antioxydants sont des composés chimiques qui réduisent ou neutralisent l'oxydation des cellules. Certains des plus importants antioxydants sont des vitamines **(Zhang et Hamauzu 2004).**

La plupart des antioxydants dans le corps sont synthétisés au moyen de processus physiologiques naturels, tandis que les autres proviennent de l'alimentation. La totalité des antioxydants de source alimentaire provient des métabolites secondaires des plantes. Certains sont des polyphénols, mais certains, comme la beta-caroténe, l'alpha-caroténe et le lycopéne, ne le sont pas. Ces importants antioxydants caroténoïdes ne présentent pas l'anneau phénolique qui caractérise les polyphénols **(Charles M, 2005).**

Les antioxydants piègent les radicaux libres en inhibant les réactions à l'intérieur des cellules provoquées par les molécules de dioxygène et de peroxyde, aussi appelées espèces oxygénées radicalaires (EOR) et espèces azotées radicalaires.

- **Composés phénoliques**

Les polyphénols regroupent plusieurs catégories de composés chimiques faiblement acides rattachés à un anneau phénolique ou constitués d'un anneau phénolique. Les polyphénols contiennent au moins un groupe hydroxy phénolique relié directement au composé aromatique à anneau phénolique à base de carbone. Ces derniers sont facilement oxydés en quinones par les espèces oxydées radicalaires, propriété qui leur confère leur capacité à piéger les radicaux libres. Les polyphénols ont différentes fonctions chez les plantes. Le plus important polyphénol des plantes, sur le plan du volume, est la lignine **(Charles M, 2005).** Lorsque la plante meurt, les composés phénoliques peuvent perdurer pendant des semaines et avoir une incidence sur la décomposition, ils ont également une incidence sur la durée de conservation des fruits et légumes après la récolte.

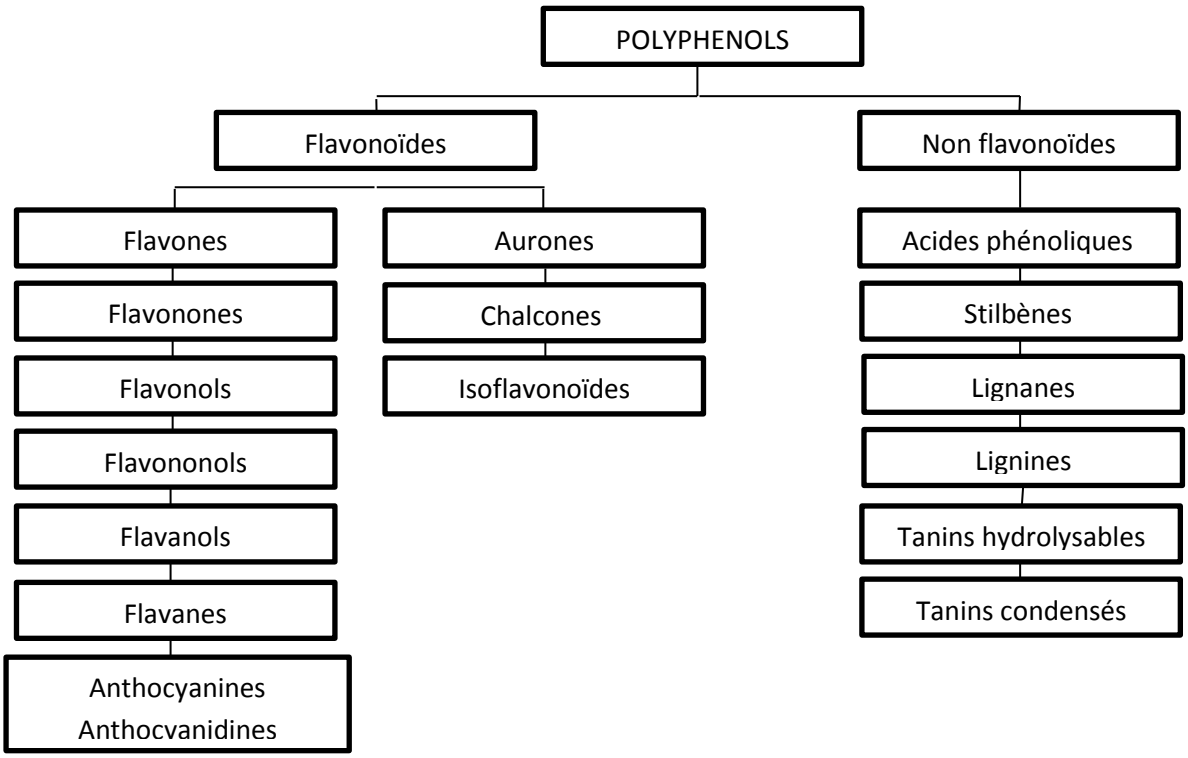


Figure 2. Classification des composés phénoliques**(Péroumal, 2014).**

- **Caroténoïdes**

Les caroténoïdes constituent une imposante famille de pigments de nature terpénoïde, dont la couleur varie du jaune au rouge orangé (absorption de la lumière entre 400 et 550 nm.)**(Nicol et Maudet, 2000).** Les caroténoïdes sont des précurseurs de la vitamine A, ces

molécules participent à la protection de la cellules contre les attaques radicalaires **(Hurst, 2008).**

Ce sont des composés hydrophobes à structure hydrocarbonée de quarante atomes de carbone. Deux classes de caroténoïdes peuvent être différenciées en fonction de leur structure **(Antoine Edouard Degrou, 2013)** :

La figure 3 donne les structures de quatre caroténoïdes majeurs de notre alimentation. Deux sont des carotènes :

- le lycopène, pigment majoritaire de la tomate. Il est linéaire et contient 11 doubles liaisons ;
- Le β-carotène est le pigment majoritaire de la carotte, il est issu de la cyclisation du lycopène dans la biosynthèse des caroténoïdes.

Deux sont des xanthophylles :

- la lutéine présente dans la carotte, le maïs, et l'épinard ;
- la zéaxanthine, isomère de la lutéine, responsable de la couleur jaune des grains de maïs.

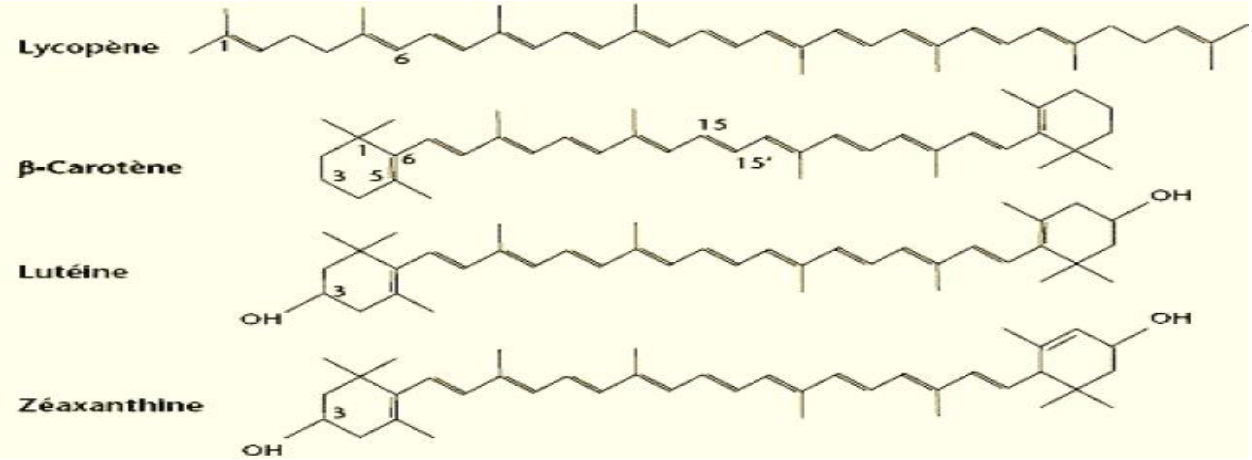


Figure 3. Structure des quatre caroténoïdes majeurs de l'alimentation humaine **(Antoine Edouard Degrou, 2013).**

- **Flavonoïdes**

C'est le groupe le plus représentatif des composés phénoliques. Ces molécules ont des structures chimiques variées et des caractéristiques propres. Elles sont omniprésentes dans les fruits, les légumes, les graines, les boissons tels le thé et le vin rouge et d'autres

parties de la plante**(Benhammou, 2012).** Elles se produisent dans chaque organe mais sont concentrées en feuilles et fleurs **(Amado, Fonseca et *al*, 2011).**Structuralement, les flavonoïdes se répartissent en plusieurs classes de molécules, dont les plus importantes sont les flavones, les flavonols, les flavanones, les dihydroflavonols, les isoflavones, les isoflavanones, les chalcones, les aurones, les anthocyanes et les tanins**(Bessaoud, 2015).**

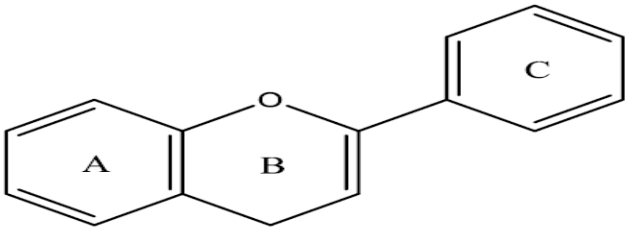


Figure 4. Structure générale des flavonoïdes**(Bessaoud, 2015).**

- **Anthocyanes**

Les anthocyanes sont des composés naturels de la famille des flavonoïdes**(Palé, Kouda-Bonafos et *al*, 2004)**. Ils sont responsables du couleur attrayante de beaucoup de fruits et légumes**(Zozio, Pallet et *al*, 2011).** Jusqu'à maintenant, on a relevé plus de 300 différents anthocyanes d'origine végétale, dont les plus connus sont la cyanidine, la delphinidine, la pétunidine, la pélargonidine, la péonidine et la malvidine (Fig 5) **(Labbé, 2008).**

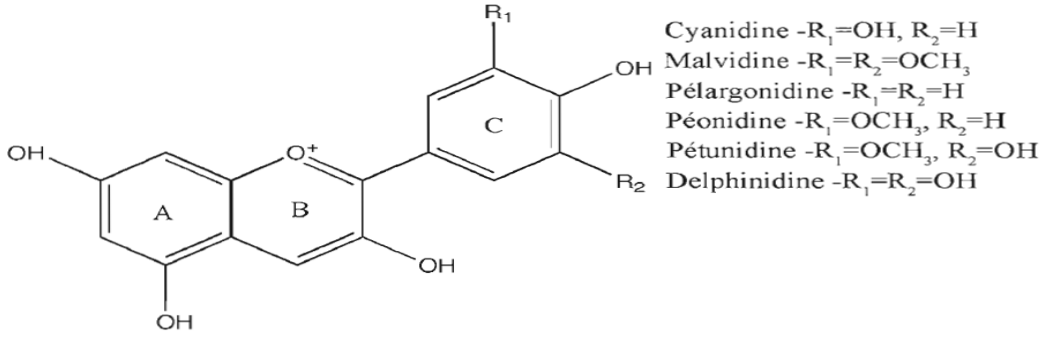


Figure 5. Structure des principaux anthocyanes**(Labbé, 2008).**

I.6. Production de la carotte

- **Mondial**

La carotte, par sa valeur nutritionnelle, ses modes de consommation simples et variés, ainsi que par son prix modéré, est le légume racine le plus consommé au monde **(Chaux et Foury, 1994).** Sa production mondiale est en constante progression et atteint,

pour l'année 2010, les 33,7 millions de tonnes3 sur une superficie d'environ 1,2 millions d'hectares à travers le monde **(Faostat [Internet])**.*Pour une raison de classification des produits par FAOstat, les données présentées pour la production mondiale concerneront les carottes,* La Chine est de très loin le premier producteur mondial de carotte avec une production de plus de 15,9 millions de tonnes enregistrées en 2010 (figure6, voir annexe). **(Barat J et *al,* 2012).**

- **National**

La production de la carotte est Très répandue dans les régions du littoral (Alger Boumerdes Mostaganem), Les hauts plateaux (M'sila- Oum el bouaghi, Sétif) et le sud (Adrar-Biskra-Ghardaia-El oued) **(ITCMI, 2010).**

Parmi les variétés de carotte les plus répondus en Algérie sont :

Super muscade, Muscade, Touchon - Nantaise amélioré, Napoli, Presto, Premia…etc **(ITCMI, 2010).**

I.7. Utilisation de la carotte

- La carotte est utilisée pour l'alimentation, c'est son utilisation la plus connue

(consommation de sa racine). Mais on peut noter que l'huile essentielle de carotte, par distillation des semences, est employée en parfumerie et aromathérapie **(Gonny et *al,* 2004 ; Reduron, 2007 ; Staniszewska et *al,* 2005).**

- Parmi les autres usages marginaux, on peut aussi mentionner son emploi comme plante

tinctoriale, par exemple pour colorer le beurre ou certains fromages **(Reduron, 2007).** Plus récemment, la production de pigments alimentaires à partir de la racine

de carotte, notamment des variétés à chair violette, s'est développée **(Downham et Collins, 2000).**

- La poudre de carotte est utilisée dans les industries agro-alimentaire en addition avec d'autres poudres de tomate, pomme de terre, poivron ou autre comme soupe industrielle, présentées dans des sachets alimentaire hermétiques et au maximum inerte vis-à-vis du contenue **(Prakasha et *al,* 2004).**
- La carotte est aussi utiliser pour la fabrication de chips de carotte grâce a une technologie innovante et cela exige le passage par la principale étape qui est le séchage.

II. Généralités sur le séchage

Adopté par l'homme comme moyen de conservation de produits agricoles depuis des décennies, le séchage est mis en œuvre de plusieurs manières différentes, pour des résultats divers**(Fokone, Edoun et *al,* 2013).** Le séchage est celui des méthodes de stockage, qui a possibilités de prolonger la période de consommation **(Alibas, 2007).** Le séchage est le processus d'enlever l'humidité dans un produit jusqu'à certaine valeur- seuil par évaporation **(Ozkan, Akbudak et *al,* 2007).**

(Bonazzi et Bimbenet, 2003) ont défini Le séchage comme une opération qui consiste à éliminer une partie de l'eau d'un produit humide par évaporation. Généralement l'objectif de séchage est d'abaisser la teneur en eau de telle sorte que son activité de l'eau soit portée à une valeur permettant sa conservation à température ordinaire pour des longues durées.

Quel que soit le mode de séchage (air chaud ou aux micro-ondes), le transfert d'eau est dû à la différence de pression de vapeur d'eau entre l'intérieur et la surface du produit, ce qui fournit une force entraînante pour l'humidité **(Maskan, 2001).**

II .1. Objectifs du séchage

Le séchage dans les industries agroalimentaires permet d'accroitre la durée de conservation des produits et réduire leur poids pour le transport (fruits, légumes, viandes,..), De stabiliser des coproduits industriels pour l'alimentation animale **(Al Haddad, 2007).** D'inhiber la croissance et l'activité des micro-organismes et par conséquent conserver la nourriture de produire des produits alimentaires intermédiaires(PAI), utilisés comme ingrédients ou additifs pour une seconde transformation. Ce sont par exemple les légumes pour potages, les fruits pour pâtisseries,... **(Bonazzi, et *al,* 2003).**

II.2. Principe du séchage

L'élimination de l'eau peut être effectuée par trois voies principales :

- ✓ **Voie mécanique**

Se réalise par un simple transfert de quantité de mouvement mais pas avec un transfert thermique exemple : Centrifugation, filtration, égouttage, essorage, pressage **(Bonazzi et Bimbenet, 2003).**

- ✓ **Voie chimique**

Méthodes extractives basées sur des interactions chimique, physique ou physicochimique, telle que la déshydratation imprégnée par immersion **(Jaean-Jacques et *al,* 2003).**

- ✓ **Voie thermique**

Ce type d'opération est essentiellement un transfert de masse nécessitant au préalable une activation de l'eau par une certaine quantité d'énergie apportée par un transfert de chaleur **(Jaean-Jacques B et *al,* 2003).**

Durant le séchage, la chaleur est transférée au produit selon trois mécanismes **(Bimbenet et *al,* 2002).**

- par conduction : le produit humide est en contact direct avec une surface chaude. La chaleur se déplace du corps le plus chaud au moins chaud (**Jean V, 2011).**
- par convection : il s'agit du mode de transfert le plus courant :
  - à partir de la vapeur d'eau surchauffée ou d'un liquide non miscible à la vapeur d'eau. Il s'agit alors d'un séchage par ébullition.
  - à partir d'un gaz vecteur de chaleur. Dans ce cas, le gaz sert aussi de vecteur à la vapeur d'eau. C'est un séchage par entraînement **(Jean V, 2011).**
- par rayonnement : le produit est exposé à un rayonnement infrarouge ou microondes, ainsi que le séchage solaire à ensoleillement directe **(Jean V, 2011).**

II.3. Méthodes du séchage

Pour extraire l'eau d'un produit, différents modes peuvent être utilisés.

II.3.1. Séchage par entrainement

Lorsqu'un corps humide est placé dans un courant d'air (ou dans un autre gaz) suffisamment chaud et sec, il s'établit spontanément entre ce corps et l'air un écart de température et de pression partielle de vapeur d'eau (**Linden et Lorient, 1994).** Il s'ensuit un transfert de chaleur de l'air vers le produit, sous l'effet de l'écart de température et un transfert d'eau en sens inverse du fait de l'écart de pression de vapeur d'eau entre la surface du produit et l'air environnant. Le séchage est dit « isenthalpique » si l'énergie nécessaire à la

vaporisation de l'eau est exactement égale à celle apportée par l'air chaud (**Daudin**, **1983 ; Jean V, 2011).**

II.3.2. Séchage par ébullition

Un séchage par ébullition a lieu lorsque le flux thermique transféré au produit est très intense à cause d'un écart de température très élevé entre la source chaude et le produit (par conduction sur une surface chaude (séchoir cylindre), par rayonnement (séchoir microondes), par convection (séchoir à vapeur d'eau surchauffée), par immersion dans de l'huile chaude). Dans toutes ces conditions la température du produit atteint un niveau tel que la pression de vapeur d'eau (p) de ce produit est égale ou dépasse à la pression totale ambiante (pt): $p \geq p$ **(Bimbenet et Bonazzi, 2003)**. L'ébullition proprement dite s'observe difficilement dans les solides ou les corps pâteux que dans les liquides **(Perkin**, **1980 ; Jean, 2011).**

II.3.3. Séchage à l'air libre

Cette méthode est la plus ancienne et elle est utilisée jusqu' à nos jours. Elle est basée sur un transfert de l'eau de la matrice voulue séchée vers l'air ambiant. En effet, une faible humidité relative de l'air correspond à une température élevée, ce qui lui confère une plus grande capacité d'entrainement de l'humidité. Ainsi L'augmentation de la température de l'air ambiant est sans effet sur sa teneur en vapeur d'eau, mais les variations de température dans une matrice hydratée aura une incidence sur le contenu en vapeur d'eau de cette dernière **(Hossain et al, 2003).**

II.3.4. Séchage par micro-onde

Plusieurs méthodes de séchage existent, entre autres le séchage par microondes qui est efficace en énergie et en temps et peut, dans certains cas, améliorer la préservation de la qualité du produit **(Li et *al,* 2010).**

II.3.4.1. Définition

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

situent dans les hyperfréquences, entre les ondes radios (108 Hz) et l'infrarouge (1012 Hz) **(Rougier, 2003).**

II.3.4.2. Principe

Le phénomène fondamental responsable du chauffage microondes (appelé aussi chauffage par hystérésis diélectrique) est la dégradation par dissipation d'une partie de l'énergie transportée par l'onde électromagnétique. Un matériau diélectrique est un isolant donc un mauvais conducteur d'électricité. Il s'échauffe du fait de la polarisation et de la rotation de ses dipôles puis de leur relaxation lorsqu'ils sont soumis à des champs électriques alternatifs.

Le dégagement de chaleur résultant diffère fondamentalement du chauffage par effet Joule qui est provoqué par des frictions internes entre les électrons et les molécules. De plus, contrairement au chauffage classique, il a lieu dans le volume, d'où son appellation de « chauffage volumique » **(Singh et Heldman, 2001).**

II.3.5. Séchage à l'étuve

Il faut préciser la consigne de température de l'étuve, le temps de séjour et la taille de l'échantillon testé. Même si cette taille n'est pas en générale critique, le temps de séjour dans l'étuve doit être adapté au rapport surface/volume. La meilleure durée est « jusqu'à poids constant » pour atteindre la masse sèche. La perte de poids est calculée par la différence de pesée avant et après séchage. L'air présent dans l'étuve peut être augmenté par la vapeur émise par les échantillons séchés en fonction du renouvellement de l'atmosphère interne de l'étuve c'est pour cela les étuves ventilées sont les meilleur et les plus utilisés **(Jean, 2009)**.

Il existe d'autres modes de séchage, entre autre :

- Séchage par friture ; qui est l'immersion d'un produit humide dans un bain d'huile chaude **(Gardeli et *al,* 2008)**.
- Séchage par lyophilisation, dont l'eau passe directement de l'état solide (glace) vers la phase vapeur sans l'étape de fusion, ce changement d'état étant appelé « sublimation » **(Kivçak et *al,* 2005).**

II.4. Intérêts du séchage des fruits et légumes

La transformation des fruits et légumes frais en produits séchés présente divers avantages :

- L'activité de l'eau du produit ainsi traité atteint des valeurs suffisamment basses pour inhiber le développement des microorganismes et stopper les réactions enzymatiques et donc la dégradation de l'aliment **(Nout et *al,* 2003).**

-les activités des micro-organismes, des enzymes ou des ferments dans le matériel sont supprimés par l'intermédiaire du séchage **(Alibas et *al,* 2007).**

- La diminution du poids et du volume est une économie importante pour le conditionnement, le transport et le stockage **(Guersson, 2004).**

- Le séchage des fruits et légumes permet d'améliorer leurs indices de digestibilité, de donner une meilleure acceptabilité des produits par les consommateurs s'il est sous une forme attrayante, de valoriser les produits locaux et de diversifier les produits existants **(Ramboatiana, 2010).**

- Le séchage permet la conservation des récoltes pour une vente ultérieure. Les produits séchés et bien emballés peuvent être vendus à des prix plus intéressants **(Guersson, 2004).**

- Faire sécher fruits et légumes est une technologie simple et aiderait beaucoup à la diversification du régime alimentaire **(Guersson, 2004).**

III. Matériels utilisés

III.1. Appareillage

- Balance de précision RADWAG WAS 600/C/2
- Broyeur électrique (ENIEM Tip GBA, Alger, Algérie)
- Dessiccateur RADWAG MAC 50/NP
- Etuve ventilée
- Micro-onde SAMSUNG model ME 8123ST
- Tamiseur automatique RETSH AS 200 central
- Four à moufle NABERTHERM
- Spectrophotomètre UV-Vis SRECTROSCAN50
- Vortex classicadvenced
- pH mètre EXTECH instruments (EC 500)
- un colorimètre

III.2.Produits chimiques

- Acétone(PROLABO)
- Carbonate de sodium (Na2CO3) (SIGMA-ALDRICH)
- Folin-ciocalteu (PROLABO)
- Chlorured'aluminium (AlCl3) (SIGMA-ALDRICH)
- Méthanol (PROLABO)
- Ethanol
- Acide chlorhydrique (Hcl) (SIGMA-ALDRICH)
- Chlorure de potassium (KCl).
- Acetate de sodium (CH3CO2Na 3H2O) (BIOCHEM Chemopharma)
- Tampon phosphate
- Ferrycianide de potacium (K+) (SIGMA-ALDRICH)
- Chlorure de fer (Fe Cl3) (BIOCHEM Chemopharma)
- Bisulfite de sodium
- ABTS (SIGMA-ALDRICH)
- DPPH (SIGMA-ALDRICH)

III.3.Matériel végétal

III.3.1. Description de la variété

La carotte est une plante annuelle à racine pivotante et charnue. La partie consommée correspond à la racine de la plante, récoltée au cours ou à l'issue de la phase végétative. Elle présente une partie centrale (xylème) et une partie extérieure charnue (phloème). L'intérêt alimentaire de cette racine porte sur son goût, sa couleur, mais aussi ses caractéristiques nutritionnelles **(Aubert et Bonnet, 1977 ; Tirilly et Bourgeois, 1999).** De nombreux composés peuvent interagir dans la perception du goût. Parmi ceux-ci, les sucres (saccharose, glucose, fructose), les terpénoïdes qui contribuent à l'âpreté (goût typique de la carotte) et les polyphénols sont les plus influents sur la perception de la saveur **(Alasalvar et *al*, 2001 ; Le Clerc, 2001).**

III.3.2.La collecte

Ce présent travail porte sur l'étude de l'une des variétés généralement utilisée pour l'alimentation humaine, certaines variétés sont cultivées essentiellement pour l'alimentation animale (racines et feuilles). La carotte (*Daucus carota*); dont la partie étudiée est la racine; Le matériel végétal a été récolté en mois de février et mars à partir de deux champsl'un dans les régions de Sétif et l'autre AKBOU wilaya de Bejaia.

III.4.Préparationet séchage du matériel végétal

III.4.1. Préparation de Biomasse récoltée

Au laboratoire, les légumes ont été triés, bien lavés avec de l'eau de robinet et suivi de l'eau distillée, ensuite, la carotte a été découpée en fines tranches sous forme de rondelle d'épaisseur de 0,5 à 1cm. Les fines tranches de carotte ont subi deux types de séchage micro-onde et étuve (à des différentes puissances et températures).

Figure 7. Photographie de tranches de carotte **(prise par l'auteur).**

Des échantillons de 50g de la carotte de couleur violette type nantaise *(Daucus carota*), ont été séchés avec deux différentes procédésà savoir : Un procédé innovant «Micro-onde» et conventionnel « Etuve ».

Pour les deux types de séchage, nous avons étalé une masse de 50g de la biomasse sur un verre de montre, l'ensemble a été porté sur la plaque tournante du micro-onde, des pesées ont été effectuées d'une façon équidistante jusqu'à la pesée correspondante à l'humidité recherchée, l'opération a été arrêtée. Ce processus a été adopté pour toutes les puissances(180, 300, 450, 600, et 900 W) (Figure 8.A) et températures (40, 60, 80, 90,100 et 120°C)(Figure 8.B) testées. Les essais de séchage ont été réalisés en triple pour chaque température et chaque puissance.

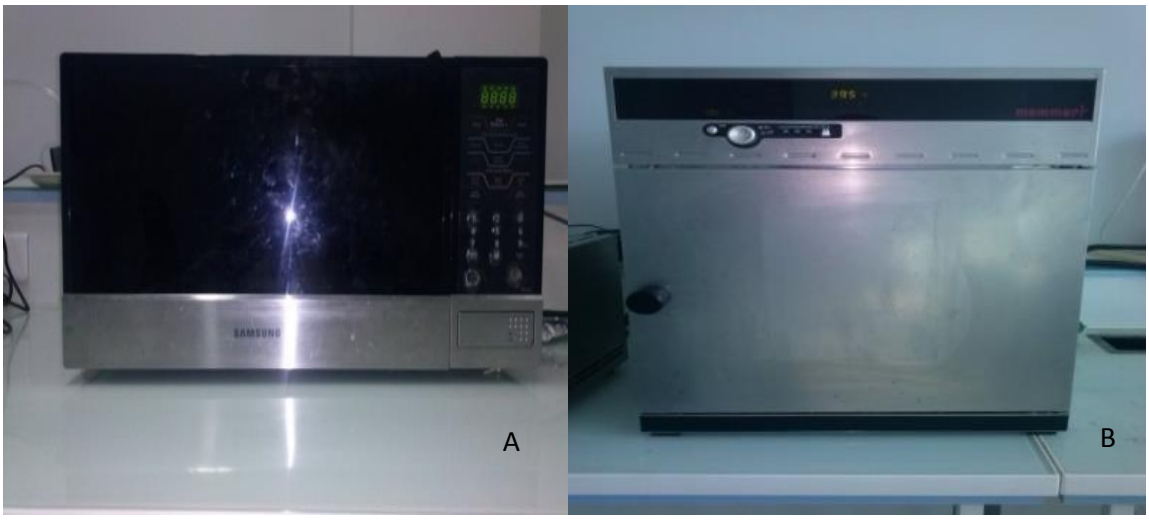


Figure 8. Photographie du micro-onde (A) et étuve (B)**(prises par l'auteur)**

III.5.Broyage et tamisage

Apres chaque opértion de sechage,la masse sechée a été broyée à l'aide d'un broyeur électrique (Figure 9.A). Les poudres ainsi obtenues ont été tamisées (Tamiseur automatique (Figure 9.B), en fractions de granulométries< 250 µm. La poudre recuperée (Figure 9.C) à été conservée dans des bocaux en verre, hermétiquement scellées, à l'abri de la lumière et de l'humidité pourdes analyses ultérieures.

Figure 9. Photographie du broyer électrique (A), tamiseur automatique (B), poudre de Carotte (C)**(prises par l'auteur).**

III.6. Etude phénoménologique des poudres séchées

III.6.1.Extraction des composés phénoliques par solvant assistée par micro-onde

L'extraction a été réalisé à l'aide d'un micro-onde domestique, ayant une cavité de dimensions de 22.5 × 37.5 × 38.6 cm et une fréquence de fonctionnant de 2,45 GHz (Fig. 10). Pour l'extraction, un gramme de la poudre de carotte a été placé dans un ballon de 250 ml qui renferme un volume de 28 ml d'éthanol à 50%. Le mélange a été irradié à une puissance de 400 W pendant 123 sec **(Dahmoune et *al*, 2013)**. Puis, le filtrat a été ré-extrait avec 15 ml dans les mêmes conditions et les deux fractions récupérées ont été combinées**.**

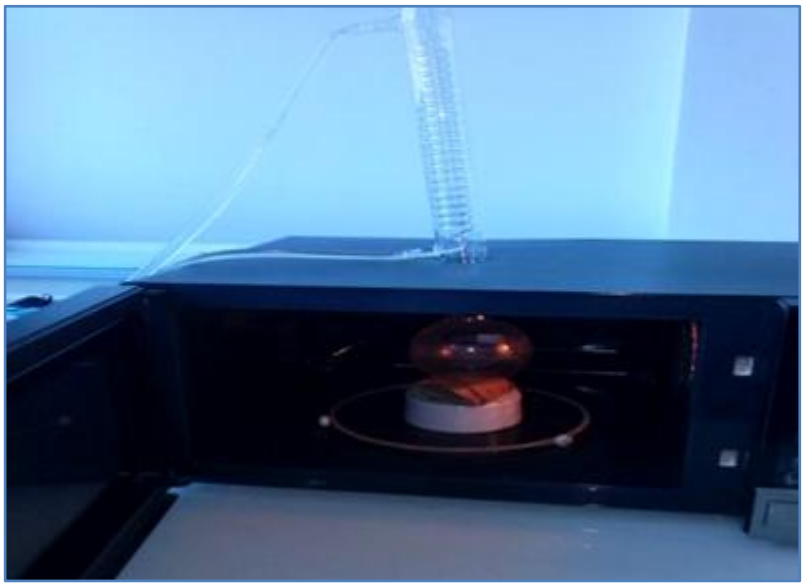


Figure 10. Prototype utilisé pour l'extraction par solvant assistée par micro-onde**(prise par l'auteur).**

III.6.2. Dosage des polyphénols

A) Les polyphénols totaux (Méthode du Follin-Ciocalteu)

Le dosage des polyphénols totaux a été effectué avec la méthode de Folin-Ciocalteu**(Georgé et *al*, 2005).** En milieu basique et en présence des composés phénoliques,le mélange phosphotungstique (H_3 PW $_{12}$ O_{40}) et phosphomolybdique (H_3 PMO_{12} O_{40}) est réduit en bleu de tungstène (W_8 O_{23}) et de molybdène (MO_8 O_{23}) lors de l'oxydation des polyphénols. La couleur bleu est proportionnelle à la teneur en polyphénols **(George et *al*, 2005).** Le protocole de dosagedes polyphénols est présenté dans la figure 12.

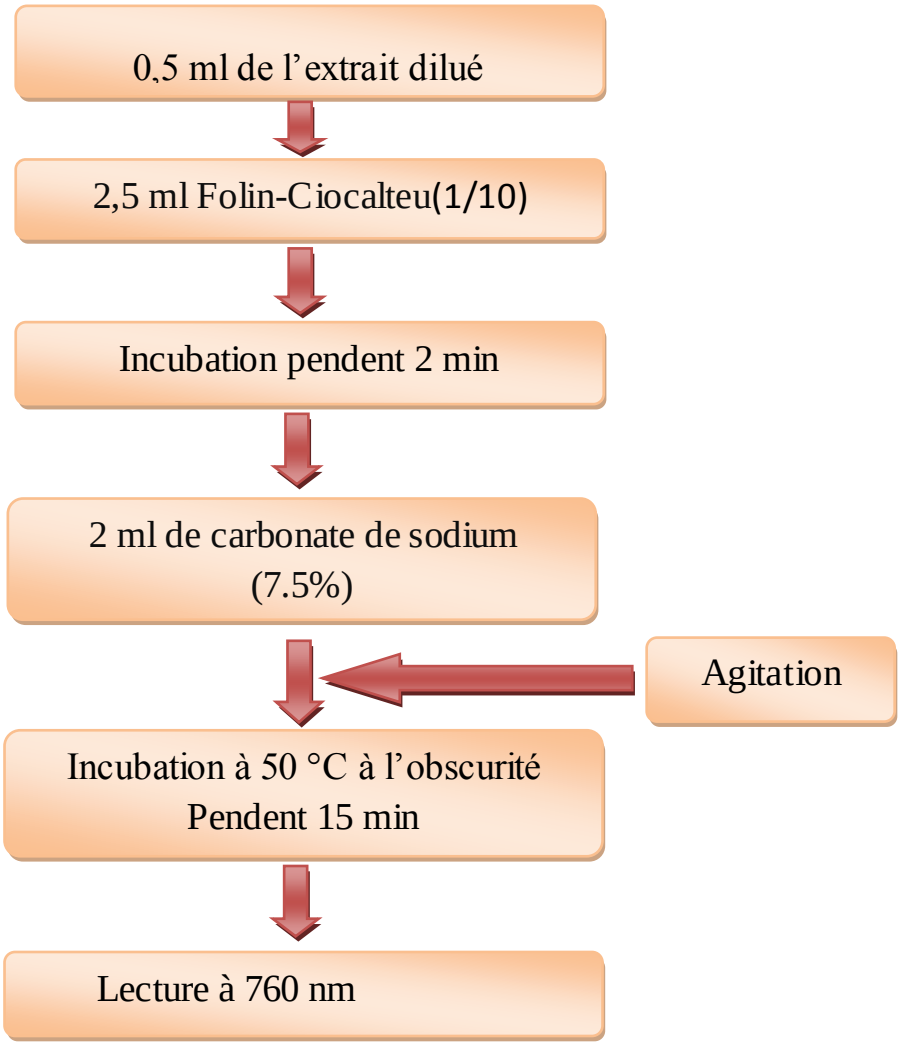


Figure 11. Protocole de dosage des polyphénols totaux **(Georgé et *al*, 2005).**

Indice des polyphénols (à 280 nm)

L'indice des polyphénols est une méthode basée sur la mesure directe de l'absorbance à 280 nm des différents extraits dilués. Les résultats sont exprimée en unité d'absorbance (AU), et calculer avec une courbe d'étalonnage Eq AG/g MS à 280 nm**(Dahmoune et *al*, 2013)**.

III.6.3. Dosage des flavonoïdes

Le dosage des flavonoïdes a été effectué selon la méthode de **(Khennouf et *al*, 2010)** basée sur le chlorure d'aluminium. Le protocole de dosage des flavonoïdes est présenté dans la figure 13.

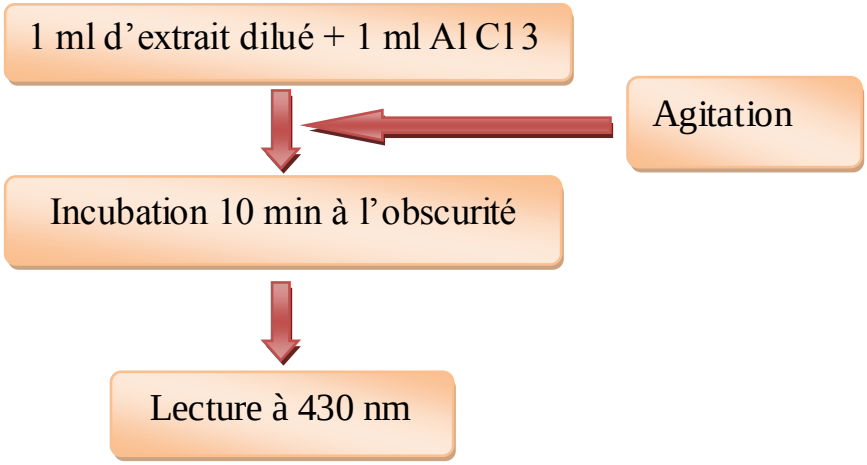


Figure 12. Protocole de dosage des flavonoïdes **(Khennouf et *al*, 2010).**

III.6.4. Dosage des anthocyanes

Le dosage des anthocyanes totaux a été effectué par la méthode du pH-différentiel **(Lee et *al*, 2005).**

Le principe de cette méthode est basé sur la capacité de changement de couleur des anthocyanes à des différents pH. Les anthocyanes monomériques totaux, présentent sous la forme d'oxonium (coloré), qui est stable à pH 1, et la forme hémicétale (décoloré) prédominante à pH 4,5. La différence dans l'absorbance des pigments à 520 nm (entre le pH 1 et 4,5) est proportionnelle à la concentration en pigment anthocyanique. Les résultats sont exprimés en équivalant mg cyanidine-3-glucoside/g de matière sèche. Les anthocyanes dégradées, sous la forme polymériques, sont résistantes au changement de couleur indépendamment du pH et elles ne sont pas inclus dans la mesure (car elles absorbent à pH 4,5 comme à pH 1,0) **(Lee et *al*, 2005).**Les concentrations en anthocyanes sont calculées selon l'équation suivante (2).

$$[ANC\ (en\ Eq\ Cyan\text{-}3\text{-}gluc/g\ de\ MS)] = \frac{A \times PM \times FD \times 10^3}{\varepsilon l} \quad (2)$$

ANC : anthocyanes (en équivalant mg cyanidine-3-glucoside/g de matière sèche) ;

A:$A=(A_{520nm}-A_{700nm})_{PH1.0}-(A_{520nm}-A_{700nm})$;

PM : poids moléculaire = 449.2 g/mol pour la cyanidine-3-glucoside ;

FD : facteur de dilution ;

ε : coefficient d'extinction molaire de la cydnidine-3-glucoside=26900 (en $L\times mol^{-1}\times cm^{-1}$)

l: le trajet optique de la cuve (en cm).

III.6.5. Détermination de l'activité antioxydante

A) ABTS

La détermination de l'activité antioxydante des extraits a été réalisée par le radical ABTS• selon la méthode de (**Roberta et al, 1998). (**Figure 14**).**

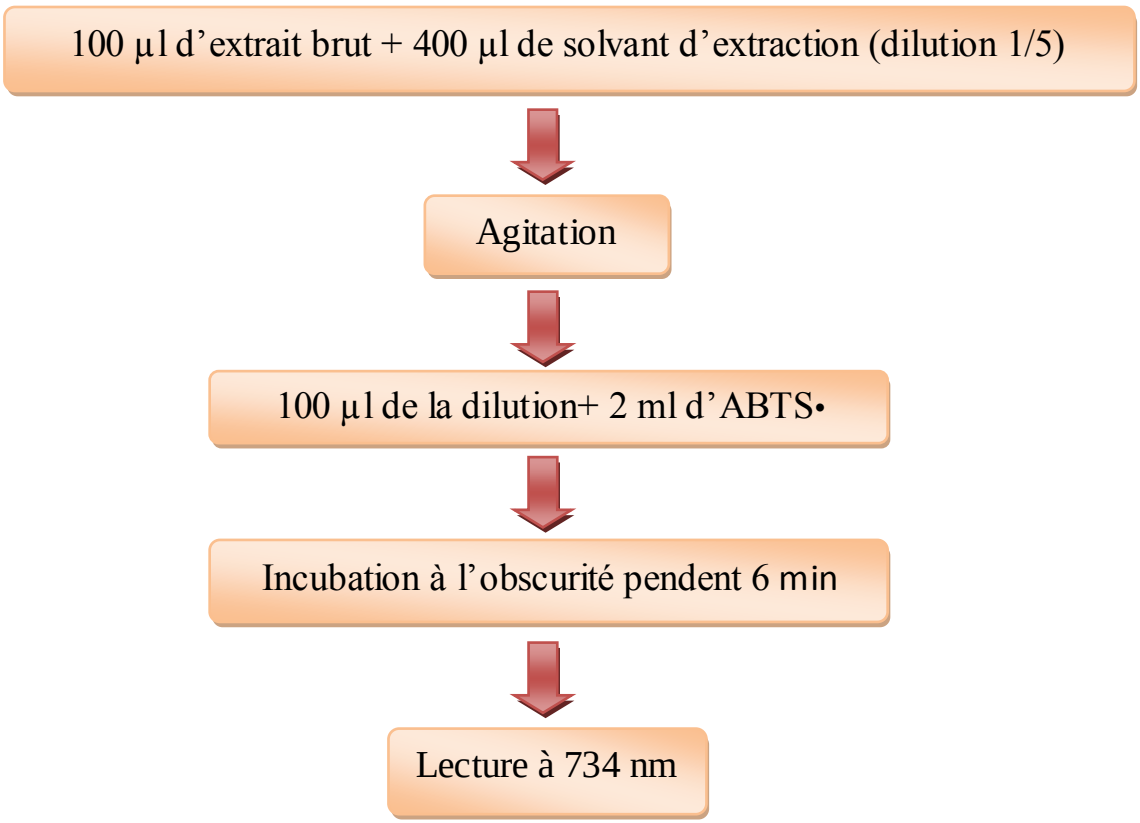


Figure 13. Protocole de détermination de l'activité antioxydant au radical ABTS• **(Robertaet *al*, 1998).**

Le pourcentage d'inhibition du radical ABTS• est exprimé par la formule (3).

$$ABTS\ (\%\ d'inhibition) = \frac{(A0-A1)}{A0} \times 100 \quad (3)$$

A_0: absorbance du control à 734 nm ;

A_1: absorbance de l'échantillon à 734 nm.

B) DPPH

La détermination de l'activité antioxydant par le radical DPPH• a été effectué selon la méthode de **(Dahmoune et *al*,2013)** (Fig. 15).

Le protocole utilisé pour la détermination de pourcentage d'inhibition du radical DPPHest illustré dans la figure 15.

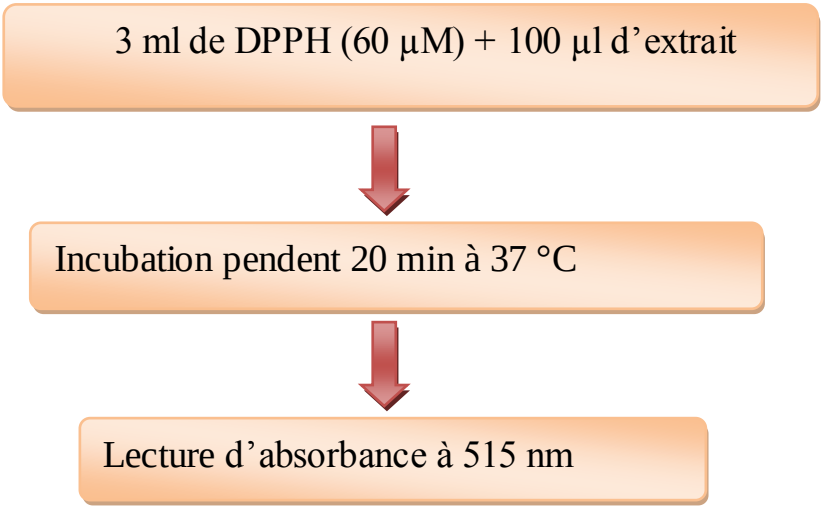


Figure 14. Protocole utilisé pour la détermination de l'activité antioxydant par le radical DPPH **(Dahmoune et *al*, 2013).**

Le pourcentage d'inhibition du radical DPPH• est exprimé par la formule (4).

$$DPPH\ (\%\ d'inhibition) = \frac{(A0-A1)}{A0} \times 100 \quad (4)$$

A_0: absorbance du control à 515 nm ;

A_1 : absorbance de l'échantillon à 515 nm.

III.6.6. Extraction et dosage des caroténoïdes

En raison de complexité et variabilité leur structure, de nombreux protocoles ont été développées afin de réaliser leur dosage. Le dosage des caroténoïdes a été précédé par une extraction solide-liquide comme le montre la figure 15.

L'utilisation de la spectroscopie UV-visible est courante dans la détection des caroténoïdes **(Rao, Waseem, et Agarwal, 1998).** Cette quantification se base sur le spectre UV-Visible des caroténoïdes, qui possède trois bandes caractéristiques entre 400 et 500 nm **(Britton etLiaaen-Jensen, 1995).**

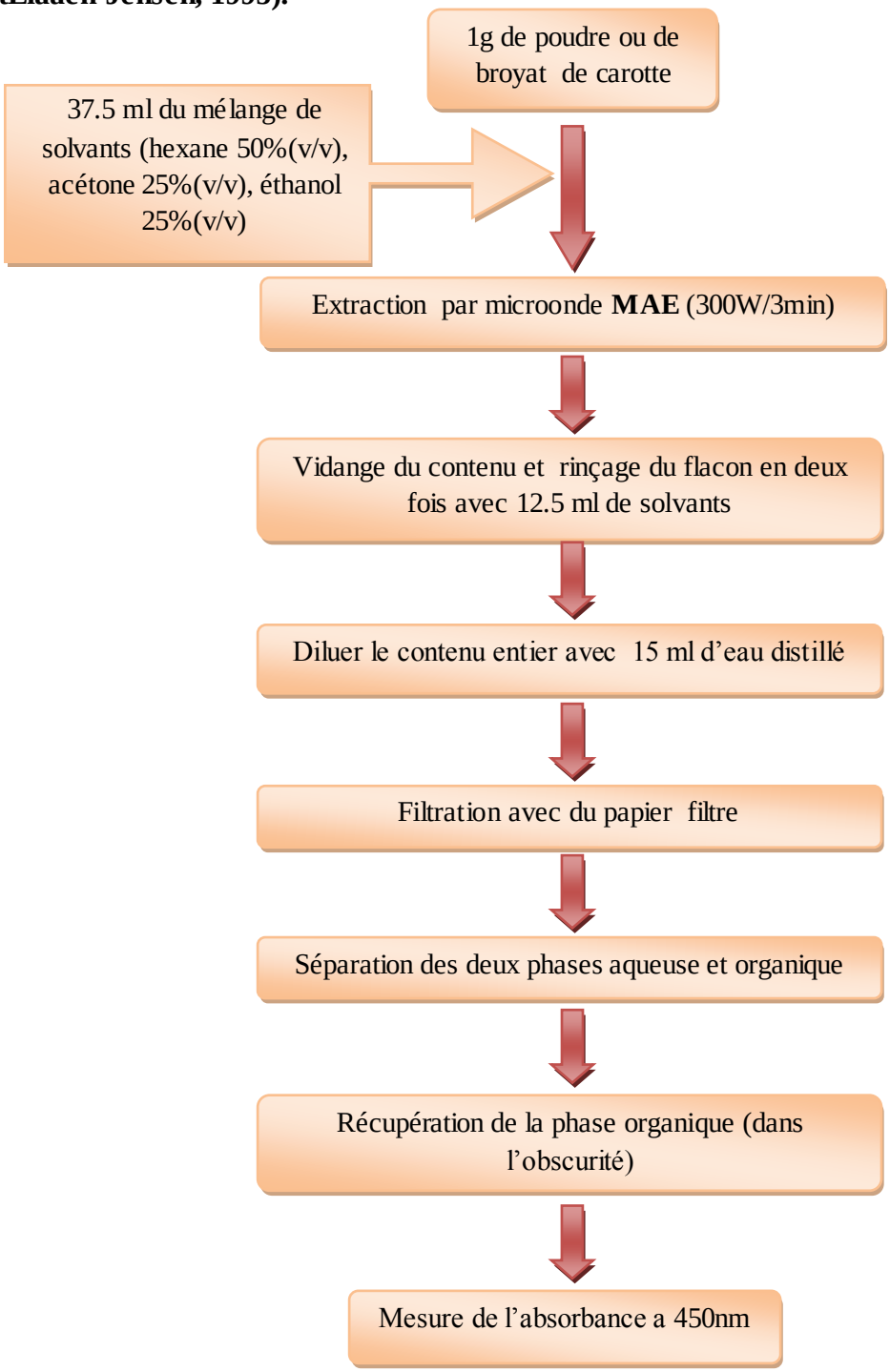


Figure 15. Protocole utilisé pour l'extraction et le dosage des caroténoïdes**(Hiranvara-chat et *al*,2013).**

On peut déduire les pertes en caroténoïdes de chaque échantillon par la formule :

$$\%\boldsymbol{perte} = \frac{[\boldsymbol{caroténoides}]\boldsymbol{initial} - [\boldsymbol{caroténoides}]\boldsymbol{éch}}{[\boldsymbol{caroténoides}]\boldsymbol{initial}} \times \mathbf{100} \quad (\mathbf{5})$$

Avec :

[Caroténoïdes] initiale : teneur en caroténoïdes de l'échantillon frais

[Caroténoïdes] éch : teneur en caroténoïdes de l'échantillon séché

III.6.7.Evaluation des paramètres de couleur

Les trois paramètres de la couleur L*, a* et b* ont étés déterminés pour les poudres de la carotte séchée à différentes puissances et températures en utilisant un colorimètre (Minolta ChromaMeter CR-300, CIE, 1976).

L*: luminosité (100: le blanc; 0: le noir)

a*: teinte verdâtre (a*<0: vert; a*>0 : rouge)

b*: teintejaunâtre (b*<0:bleu;b*>0:jaune)

Figure 16. Photographie d'un colorimètre**(prise par l'auteur).**

III.6.8.Caractérisation des minéraux

L'étude des minéraux a été réalisée dans le but de déterminer la typologie des minéraux existant dans le materiel vegetal en question, cela a été fait par la méthode de la diffraction aux rayons X (DRX).

- *Mode opératoire*

- ✓ Prendre 1 g de poudre de chaque échantillon et le mettre à l'incération dans un four à moufleà une température de 550 °C pendant 5 h ;
- ✓ passer à l'étude des minéraux à la DRX (X'Pert PRO PANalytical, Pays-bas)
- ✓ analyser à l'aide du logiciel PANalytical X'Pert HighScore (version 2.1.2)

Figure 17. Photographie de DRX (Diffraction aux Rayons X)**(prise par l'auteur).**

IV. Traitement des échantillons

IV.1. Cinétique du séchage

La relation entre la durée de conservation d'un produit alimentaire et son degré d'hydratation est connue depuis toujours. L'eau intervient dans un très grand nombre de phénomènes d'altération : modifications biochimiques ou biophysiques, réactions enzymatiques ou encore processus d'ordre microbiologique. Le séchage des échantillons permet d'assurer une meilleure élimination d'eau tout en préservant la composition des cellules en substances d'intérêts.

Dans cette partie, nous nous sommes intéressés à l'approche expérimentale qui consiste à déterminer le comportement cinétique des carottes au cours de son séchage dans des conditions de température et de puissance contrôlées à l'aide d'une étuve ventilée et micro-onde. Ce qui est qualifié par un séchage conventionnel (étuve) et innovant (micro-onde).

IV.1.1.Cinétique du séchage par micro-onde de la carotte (*Daucus carota*)

La figure 18, représente la perte de masse en fonction du couple temps-puissance du séchage micro-onde de la carotte.

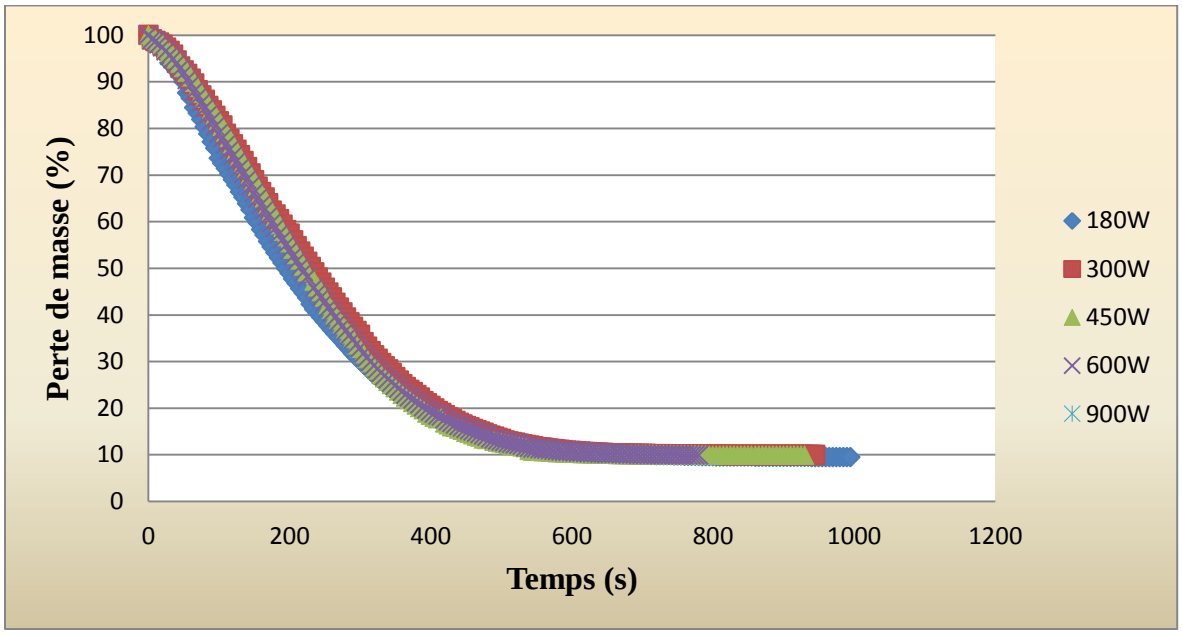


Figure 18. Evolution de la perte de masse en fonction du couple temps-puissance de séchage par micro-onde.

La courbe nous laisse constater que la perte en poids des tranches de carotte est proportionnelle au couple temps-puissances pour toutes les puissances étudiées. Les temps de séchage les plus courts sont attribués à 900 W et 600 W avec 12min et 13min respectivement. Alors que, les plus lents sont obtenus à 450 W et 300 W ainsi que à 180 W avec 17min pour ce dernier.

Les résultats obtenus montrent que la durée de séchage est inversement proportionnelle aux puissances de séchage ; les temps de séchage les plus rapides sont obtenus à des fortes puissances, donc plus le niveau de séchage est élevé, plus le temps de séchage est réduit.

Le temps de séchage le plus court dans le micro-onde peut être expliqué par une haute pression interne et les gradients de concentration qui augment l'évaporation du liquide à travers le produit jusqu'à la stabilité **(Chemat F, 2008).**

IV.1.2. Cinétique du séchage à l'étuve ventilé de la carotte (*Daucus carota*)

La figure 19 représente la perte de masse en fonction du couple temps-température du séchage à l'étuve de la carotte.

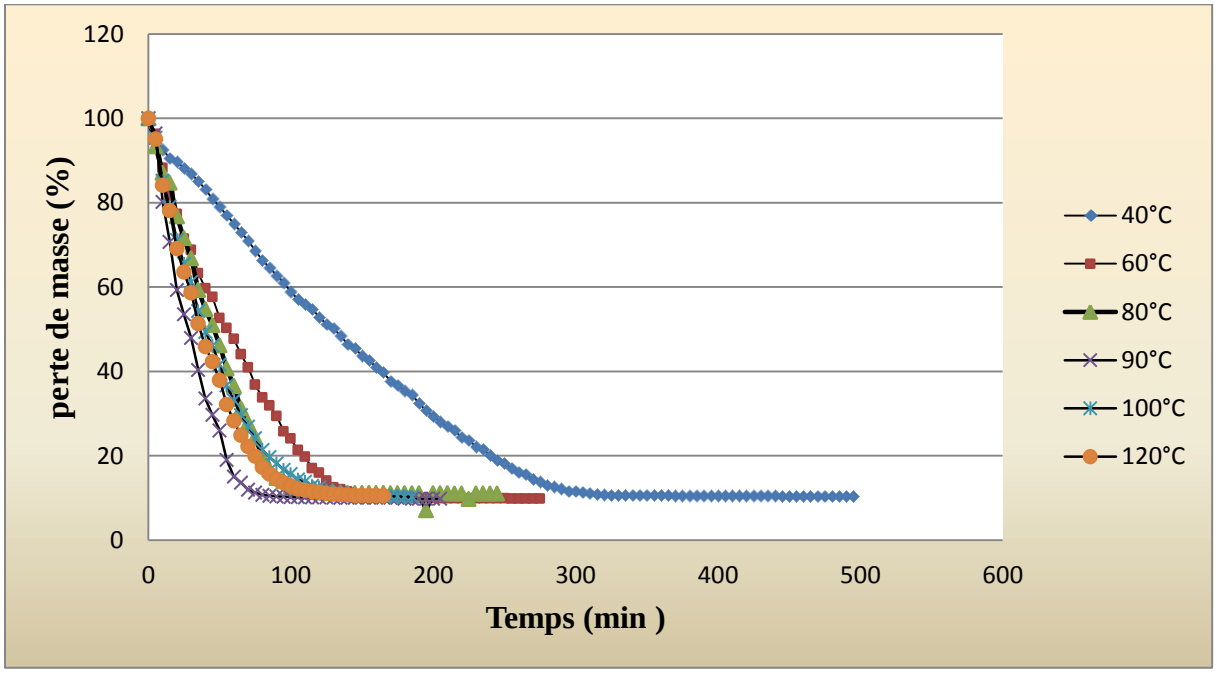


Figure 19. Evolution de la perte de masse en fonction du couple temps-température du séchage à l'étuve.

Selon la courbe on constate que la perte de masse des tranches de la carotte est proportionnelle au couple temps-température pour toutes les températures étudiées. En effet, à haut température (120°C et 100°C) la perte en eau est beaucoup plus rapide (154 et 160min, respectivement). Alors qu'à 40°C, la masse est devenue stable après 495 min, donc la vitesse de la perte est lente.

Les résultats obtenus montrent que le temps de séchage est inversement proportionnel à la température appliquée.

La stabilité du poids peut être expliquée par le faite que la température de la surface atteint celle de l'air de séchage car la force de migration de l'eau de l'intérieur vers la surface est insuffisante. D'autre part, il est également possible qu'il n'y ait plus d'eau libre dans le produit donc l'humidité de la surface est en équilibre avec l'humidité de l'air de séchage, ce qui signifie que le séchage est terminé **(Jean.2011 et Jean-Jacques et *al,* 2003).**

Par comparaison entre les deux méthodes de séchage par rapport au temps de séjour, on constate que la masse devient stable au séchage par micro-onde à un temps beaucoup plus court (17min) qu'au séchage par étuve (495min).

IV.2. Détermination du taux d'humidité et l'activité d'eau (Aw) des poudres séchées de la carotte

Dans le but d'évaluer l'efficacité du séchage en terme de perte en eau ; l'humidité et l'activité de l'eau ont été déterminées pour les différentes poudres obtenues dans les différentes conditions appliquées. Les résultats sont résumés dans le tableau II.

Tableau II. Taux d'humidité et l'activité de l'eau des différentes poudres de la carotte séchée (à l'étuve et aux micro-ondes).

Température (°C)	**H (%)**	**Aw**	**Puissance (W)**	**H (%)**	**Aw**
40	89.48	0.346	180	90.52	0.276
60	90.15	0.347	300	90.06	0.266
80	88.96	0.368	450	90.14	0.299

90	90.22	0.411	600	89.96	0.395
100	91.56	0.434	900	90.37	0.429
120	91.02	0.445			

Les résultats montrent que le séchage par microonde permet de mieux déshydrater le matériel végétal que le séchage conventionnel. Ce qui est confirmé par les niveaux d'activité de l'eau atteints par le séchage au micro-onde.

IV.3. Caractérisation phytochimique des poudres séchées

IV.3.1. Contenance en composés phénoliques des extraits des poudres de la carotte séchée

Les résultats du dosage des polyphénols totaux pour les extraits de la carotte séchée avec les différentes méthodes, exprimés en mg Equivalent Acide Gallique mg (EAG) /g poudre (pour la méthode du Follin-Ciocalteu) est exprimé en terme d'absorbance (pour l'indice de polyphénols à 280 nm).

A) Contenance en composés phénoliques des extraits de poudre de carotte séchée au micro-onde est présenté dans la figure 20.

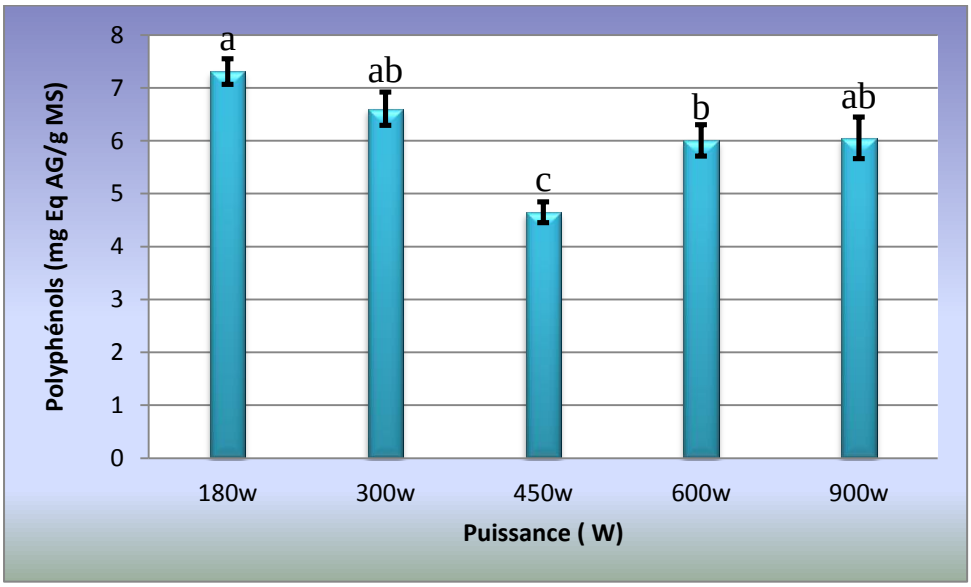


Figure 20. Teneur en polyphénols totaux des extraits de carotte séchée au Micro-onde.

Selon la figure, les teneurs en polyphénols totaux des extraits issus du séchage par micro-onde varient entre 4.64 ± 0.19 à 7.31 ± 0.24 mg Eq AG/g MS. On constate que les concentrations les plus importante sont attribuées aux puissances 180 W et 300 W avec 7.307 ± 0.241 mg Eq AG/g MS et 6.606 ± 0.314 respectivement. Une diminution de la teneur en polyphénols est constatée en passant de 300W à 900W. La plus faible teneur est attribuée à 450W 4.647 ± 0.195 mg Eq AG/g MS. Cette diminution est probablement due à la dégradation de ces composées par la longévité du temps de séchage dans le cas de 450 W soit par les fortes radiations dans le cas de 900 W qui sont des paramètres qui influencent sur la qualité des PPT.

(Ketata et *al,* 2010) affirme que les hautes puissances de séchage influent négativement sur la qualité phénolique. La teneur élevée en polyphénols à la puissance 180 W peut être expliqué par les faibles radiations qui n'ont pas induit la dégradation des composés phénoliques.

Les effets du processus de séchage par MO sur les substances phénoliques des aliments ont été étudiés, certain auteurs ont signalé qu'il y a un effet sur les composés phénoliques (**Akyıldızet *al,* 2004),** et certains ont déclaré qu'il n'y a pas un changement important sur la concentration de ces composés **(Dewanto et *al,* 2002).**

Concernant la contenance en composés phénoliques des extraits de poudre de carotte séchée à l'étuve, les résultats obtenus sont illustrés dans la figure 21.

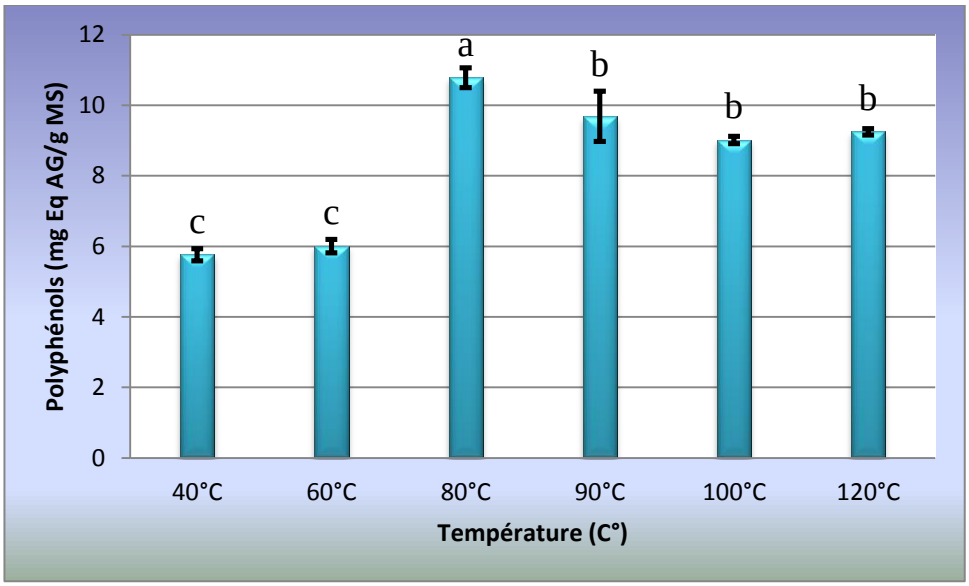


Figure 21. Teneur en polyphénols totaux des extraits de carotte séchée à l'étuve.

Selon la figure, les teneurs en polyphénols totaux des extraits issus du séchage à l'étuve varient entre 5.76 ± 0.17 à 10.78 ± 0.28 mg Eq AG/g MS. En effet la teneur la plus élevée est attribuée à 80°C et 90°C, par contre une faible teneur est de 5.762 ± 0.173 est obtenue à 40°C. Les faibles teneurs à 40°C et 60°C en composés phénoliques peuvent être dues à un effet de temps ou la température ou les deux en même temps (**Klimczak et *al,* 2007)**.

Le tableau III résume les résultats obtenus de l'indice de polyphénols des extraits des poudres de carotte séchée au micro-onde et à l'étuve (exprimer en mg Eq AG/g MS à 280 nm).

Tableau III. Indice des PPT obtenu par analyse spectrale.

	Indice de PPT
Puissance (W)	
180	1,619
300	1,578
450	1,224
600	1,408
900	1,335
Température (°C)	
40	1,018
60	1,039
80	1,225
90	1,145
100	1,085
120	1,129

Selon le tableau on constate que les concentrations les plus élevées en PPT après le séchage par micro-onde sont observées aux puissances 180W et 300W donnant des teneurs de 1.619 et 0.578 respectivement.

Concernant le séchage à l'étuve les teneurs les plus élevées en PPT sont obtenues à 80°C et 90°C avec des concentrations de 1.225 et 1.145 respectivement.

Ces résultats s'accordent parfaitement avec les teneurs en polyphénols totaux en utilisent la méthode du Follin-Ciocalteu notamment pour l'étuve.

La comparaison entre les deux types de séchage en termes de teneurs en PPT, montre que le séchage par étuve préserve mieux les PPT que le MO. Par contre, les teneurs en PPT des MO sont obtenues en un temps beaucoup plus court par rapport à celle obtenue par étuve.

IV.3.2. Contenance en flavonoïdes des extraits des poudres de la carotte séchée

Les teneurs en flavonoïdes contenues dans les poudres issues de différentes méthodes de séchage sont exprimées en mg équivalent rutine/g de matière sèche.

Les résultats obtenus pour le dosage des flavonoïdes des extraits des poudres de carotte séchée au micro-onde sont présentés dans la figure 22.

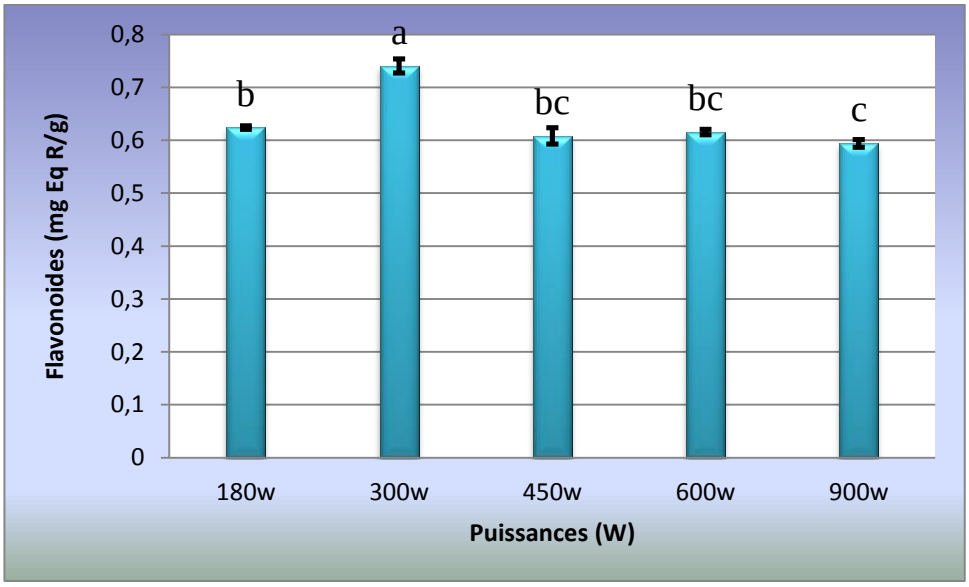


Figure 22. Teneur en flavonoïdes des extraits de carotte séchée au micro-onde.

Selon la figure, on constate que le rendement le plus important en flavonoïdes est attribué aux puissances 300Wavec 0.740 ± 0.013 mg Eq Rutine/g de MS. De plus on augmente la puissance on observe une diminution de la teneur en flavonoïdes pour atteindre une valeur minimal de 0.593 ± 0.007 mg Eq Rutine/g de MS. Cependant, le séchage à hautes puissances diminue le rendement en flavonoïdes. Selon **(Liu et *al*, 2007 ; Zhang, 2007),** cette diminution est probablement due aux fortes radiations des micro-ondes responsables de la décomposition des flavonoïdes.

Les résultats obtenus pour le dosage des flavonoïdes des extraits des poudres de carotte séchée à l'étuve sont présentés dans la figure 23.

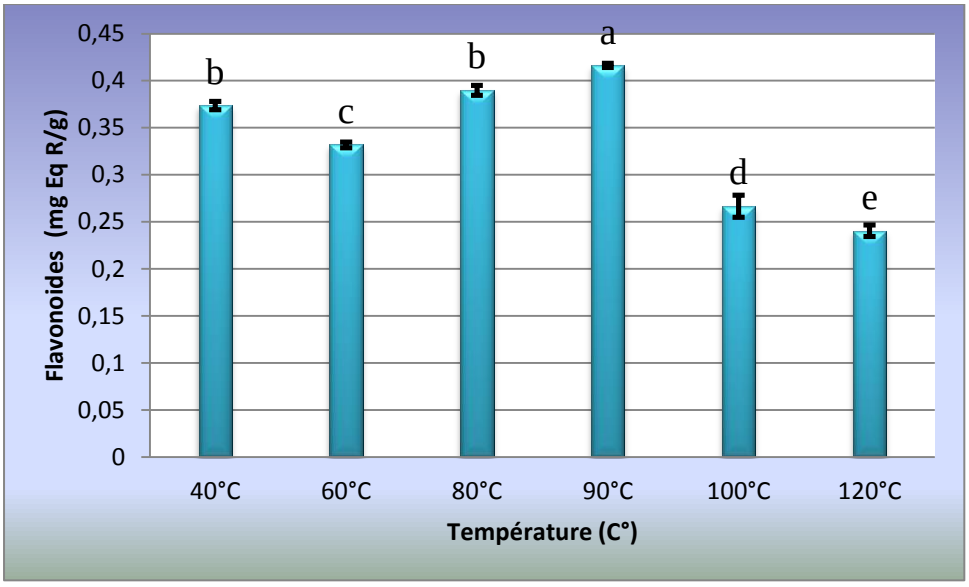


Figure 23. Teneur en flavonoïdes des extraits de carotte séchée à l'étuve.

Selon la figure on remarque que la teneur optimal en flavonoïdes est de 0.416 ± 0.002mg Eq Rutine/g MS à 90°C, suivi de 0.374 ± 0.004mg Eq Rutine/g MS et 0.332 ± 0.003mg Eq Rutine/g MS pour 40°C et 60°C respectivement. Par contre les plus faibles teneurs sont attribuées à 100°C et 120°C avec 0.266 ± 0.011mg Eq Rutine/g MS et 0.241 ±0.006mg Eq Rutine/g MS.

En comparaison aux extraits obtenus par séchage au microonde, le rendement en flavonoïdes a diminué au chauffage conventionnel.

Selon l'étude statistique, le séchage au micro-onde donne un meilleur rendement en flavonoïdes que le séchage par étuve.

IV.3.3. Contenance en anthocyanes des extraits des poudres de la carotte séchée

Les résultats de la contenance en anthocyanes obtenus pour les extraits de poudres de carotte (*Daucus carota*) séchée avec les deux méthodes de séchage sont exprimés en mg équivalent cyanidine-3-glucoside/g de matière sèche (MS).

A) Contenance en anthocyanes des extraits de poudre de carotte séchée au micro-onde

Les résultats obtenus de la contenance en anthocyanes des extraits des poudres de carotte séchée sont présentés dans la figure 24.

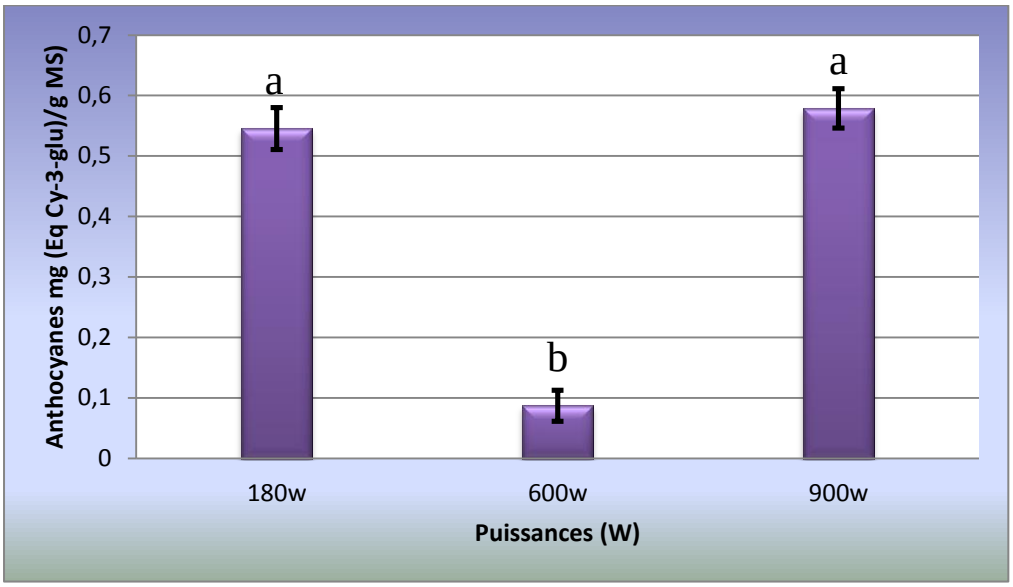


Figure 24. Teneur en anthocyanes des extraits de carotte séchée au micro-onde.

Les teneurs en anthocyanes des différents extraits de la carotte séchée varient entre 0.087 ± 0.025 à 0.579 ± 0.033 mg Eq cy-3-glu/g de MS ; on s'aperçoit que les valeurs les plus importantes reviennent à 900W et 180W avec 0.579 ± 0.033 et 0.545 ± 0.035 mg Eq cy-3-glu/g de MS respectivement. La plus faible teneur est retrouvée à 600W avec 0.087 ± 0.025 mg Eq cy-3-glu/g de MS.

Par contre, dans les puissances 300W et 450W, on constate une absence d'anthocyanes.

B) Contenance en anthocyanes des extraits de poudre de carotte séchée à l'étuve

Les résultats obtenus de la contenance en anthocyanes des extraits des poudres de carotte séchée sont présentés dans la figure 25.

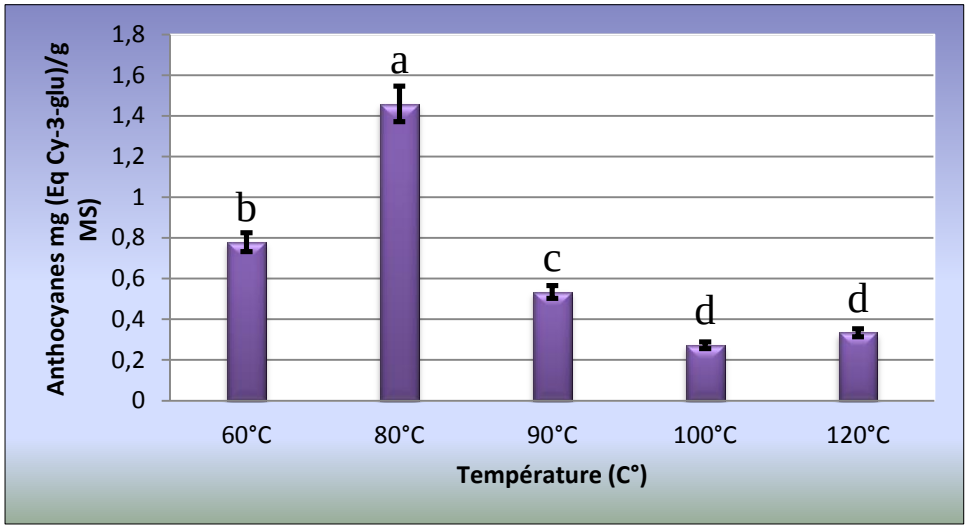


Figure 25. Teneur en anthocyanes des extraits de carotte séchée à l'étuve.

Les teneurs d'anthocyanes des différents extraits de la carotte séchée à l'étuve diffèrent selon la température de séchage, ces dernières varient entre 0.273 ± 0.016 à 1.458 ± 0.087 mg Eq cy-3-glu/g de MS. En effet la teneur optimale en anthocyanes revient à la température 80°C avec 1.458 ± 0.087 mg Eq cy-3-glu/g de MS, suivi de 60°C d'une teneur de 0.779 ± 0.047. Les faibles teneurs sont obtenues à 120°C et 100°C avec 0.334 ± 0.020 et 0.273 ± 0.016 respectivement. Par contre dans le cas de la température 40°C on constate une absence d'anthocyanes.

Les faibles teneurs observées en anthocyanes sont peut-être dues à leurs dégradations par les températures élevées, et le temps de séjour, car les anthocyanes sont connues par leurs instabilité vis-à-vis de la chaleur **(Mpiana, Balanganayi et *al,* 2009).**

IV.3.4. Activité anti-oxydante des extraits de poudres de carotte séchée

Pour mieux comparer les techniques de séchage, nous avons étudié l'activité anti-oxydante en réalisant deux testes : le radicale cationique ABTS et le radical stable DPPH.

IV.3.4.1. Activité anti-oxydante par le teste ABTS

Ce test permet d'apprécier le pouvoir anti oxydant des extraits obtenus par séchage microondes et conventionnel.

A) Activité anti-oxydante des extraits de la carotte séchée au micro-onde

Les résultats obtenus pour le pourcentage d'inhibition du radical stable ABTS sont présentés dans la figure 26.

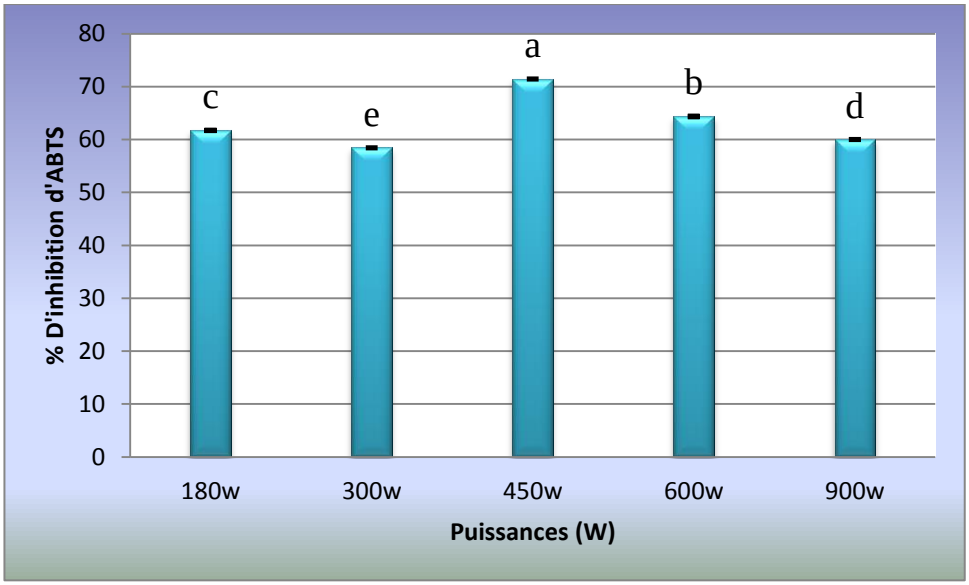


Figure 26. Pourcentage d'inhibition du radical ABTS des différents extraits de la carotte séchés au micro-onde.

Selon les résultats obtenus on constate que les différents extraits de la carotte, possèdent la capacité de réduire le radical $ABTS^{+}$. Les teneurs d'inhibition varient entre 58.450 ± 0.004 % à 71.455 ± 0.001%. En effet en passant de 180W à 450W on remarque une augmentation de la teneur d'inhibition pour atteindre le pourcentage d'inhibition le plus important à 450 W avec 71.455 ± 0.001, néanmoins, en augmentant la puissance de séchage de 450W à 900W, on observe une légère diminution de l'activité anti-oxydante pour atteindre une valeur minimale de 58.450 ± 0.004 à 900W.

B) Activité anti-oxydante des extraits de la carotte séchées à l'étuve

Les résultats obtenus pour le pourcentage d'inhibition du radical stable ABTS sont présentée dans la figure 27.

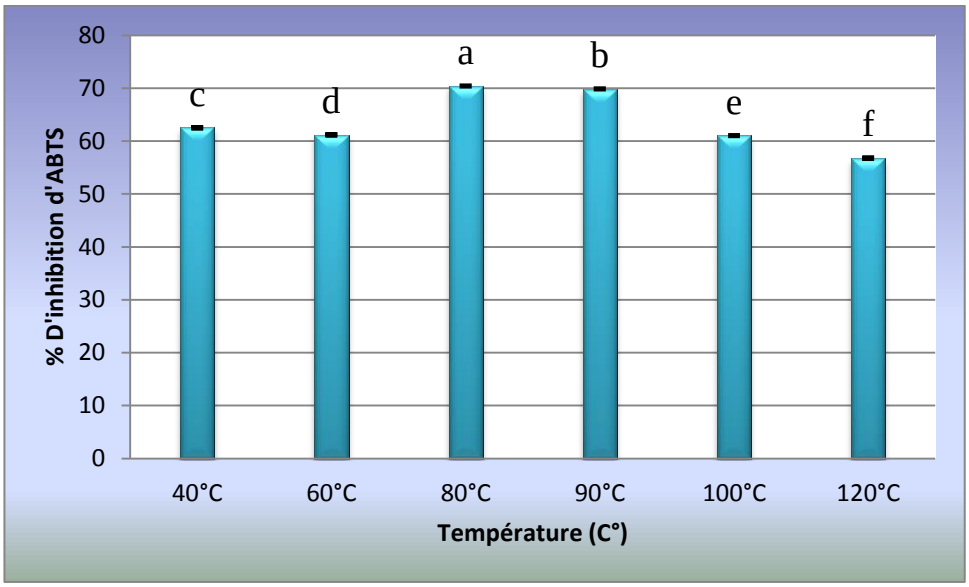


Figure 27. Pourcentage d'inhibition du radical ABTS des différents extraits de la carotte séchés à l'étuve.

Selon les résultats obtenus on constate que les différents extraits de la carotte, possèdent la capacité de réduire le radical $ABTS^{+}$. Les teneurs d'inhibition varient entre 56.760 ± 0.004% à 70.422 ± 0.001%. En effet, l'extrait obtenu à 80°C présente le meilleur pouvoir antioxydant avec 70.422 ± 0.001%, suivi de l'échantillon séché à 90°C avec 69.859 ± 0.001. De plus on augmente la température on remarque une diminution du pouvoir antioxydant pour atteindre une valeur minimale de 56.760 ± 0.004% pour 120°C.

Par comparaison avec le rendement polyphénolique, on constate qu'il y a une corrélation entre ce dernier et l'activité anti-radicalaire dans les cas (80°C ,90°C, 100°C et 120°C).

Enfin, et d'après les résultats obtenus on constate qu'il y'a pas une grande différence entre le séchage au micro-onde et le séchage à l'étuve par rapport à l'activité anti-radicalaire à l'ABTS.

IV.3.4.2. Activité anti-oxydante par le teste DPPH

Le DPPH ou 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyle agit en tant qu'un radical libre stable efficace réduit par un antioxydant, montrant un spectre d'absorption à 515 nm avec une couleur violette; la réduction de ce radical se traduit par coloration jaune **(Lee et *al,* 2001).**

A) Activité anti-oxydante des extraits de la carotte séchées au micro-onde

Les résultats obtenus pour le pourcentage d'inhibition du radical stable DPPH sont présentés dans la figure 28.

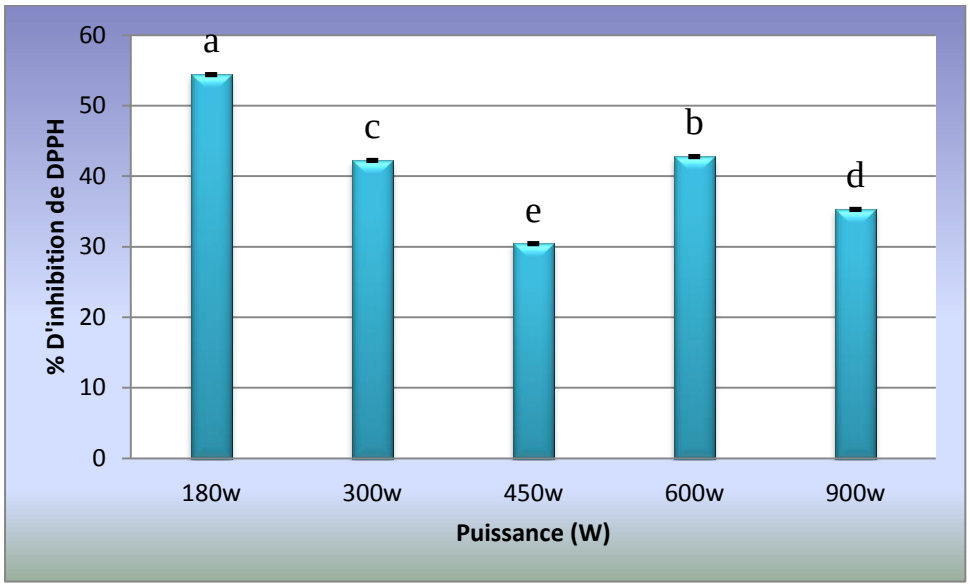


Figure 28. Pourcentage d'inhibition du radical DPPH des différents extraits de la carotte séchée au micro-onde.

Selon les résultats obtenus on remarque que les différents extraits de la carotte, possèdent la capacité de réduire le radical DPPH•.Le pourcentage d'inhibition varie significativement entre 30.430 ± 0.005% à 54.400 ± 0.004%. En effet, l'extrait obtenu à 180W présente le pouvoir antioxydant le plus important avec 54.400 ± 0.004%, suivi de la puissance 600W avec 42.790 ± 0.003. Par contre, les échantillons séchés à 900W et à 450W présentent une faible activité antioxydante avec 35.300 ± 0.002 % et 30.431 ± 0.005% respectivement. Les échantillons séchés à 450W et à 900W présentent une faible teneur en flavonoïdes et en PTT par comparaison avec ceux de 180W et 300W. Cela, montre qu'il y'à une bonne corrélation entre l'activité anti radicalaire au DPPH et la teneur en composés phénoliques ce qui est en accord avec les résultats de **(Dairi et *al*, 2014).**

B) Activité anti-oxydante des extraits de la carotte séchées à l'étuve

Les résultats obtenus pour le pourcentage d'inhibition du radical stable DPPH sont présentée dans la figure 29.

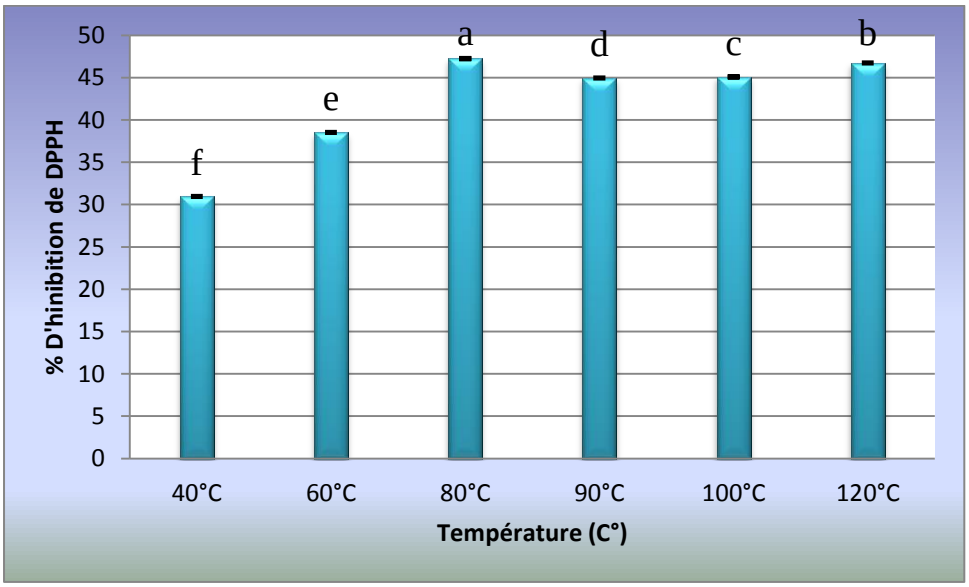


Figure 29. Pourcentage d'inhibition du radical DPPH des différents extraits de la carotte séchée à l'étuve.

Selon les résultats de la figure ci-dessus le pouvoir anti radicalaire varie entre 30.946 ± 0.006% à 47.238 ± 0.004%. En effet l'échantillon séché à 80°C présente le pourcentage d'inhibition le plus important avec 47.238 ± 0.004 %, suivi de 120°C avec 46.523 ± 0.003%. Néanmoins, l'échantillon séché à 40°C présente la plus faible activité antioxydante avec 30.946 ± 0.007%. En effet, selon le dosage de Folin-Ciocalteu, on constate qu'il y a une corrélation positive entre le pouvoir antioxydant observé et la teneur en PPT.

L'étude statistique a révélé une différence significative de l'activité anti-radicalaire des extraits obtenus par le séchage conventionnel et microonde.

Par comparaison entre les deux types de séchage on constate que c'est le séchage par micro-onde qui donne une meilleure activité.

IV.3.5. Contenance en caroténoïdes des extraits des poudres de la carotte séchée et de la carotte fraiche

La détermination de la teneur en caroténoïdes totaux comprend tous les caroténoïdes à l'exception du lycopène qui absorbe à 470 nm **(Péroumal, 2014).**

Les résultats obtenus pour le dosage des caroténoïdes et les pourcentages de la perte de ces dernières obtenus pour les extraits de la carotte séchée avec les différentes

méthodes, et de la carotte fraiche, sont exprimés en µg équivalent de β-carotène /g de matière sèche (Tableau IV).

Tableau IV. Teneur moyenne et pertes en caroténoïdes des extraits obtenus

Etat de l'échantillon	La teneur en caroténoïdes mg/100g	La perte %
FRAICHE	**8.591±0.001^{a}**	–
900W	6.213±0.002^{f}	27.680
600W	6.29±0.001^{e}	26.783
450W	6.364±0.001^{d}	25.922
300W	6.845±0.001^{c}	20.323
180W	7.274±0.001^{b}	15.329
FRAICHE	**8.591± 0.001^{a}**	**–**
120°C	3.35 ±0.001^{f}	61.005
100°C	3.4±0.007^{f}	60.423
90° C	4.745±0.001^{e}	44.767
80° C	6.452 ±0.002^{d}	24.898
60°C	7.134±0.001^{c}	16.959
40°C	7.294 ±0.001^{b}	15.097

D'après les résultats obtenus on constate que la teneur en caroténoïdes des poudres issus du séchage par micro-onde varient de 6.213±0.002 à 7.274± 0.001 mg/100g de MS. En effet, la teneur la plus élevée est de 7.274±0.001 qui est attribuée à la puissance 180W avec une perte de caroténoïdes de 15.329% par rapport au témoin (Fraiche), suivi d'une teneur de l'ordre de 6.845±0.001 pour la puissance 300W avec une perte de 20.323%. Néanmoins, on observe une diminution progressive de la teneur en caroténoïdes en

augmentant la puissance de séchage jusqu'à atteindre une valeur de 6.231±0.002 avec l'échantillon séché à 900W accompagné d'une perte de 27,680% de caroténoïdes.

Pour la teneur en caroténoïdes des poudres issues du séchage par étuve, les rendements les plus élevés sont obtenus pour les températures de 40°C et 60°C avec 7.294±0.001 et 7.134 ± 0.001 respectivement, avec une perte de caroténoïdes de 15.097% à 40°C et de 16.959% à 60°C par rapport à la fraiche.

Une diminution importante de la teneur est constatée à partir de 80°C jusqu'à 120°C avec une perte de caroténoïdes de 24.898% et61.005% pour 80°C et 120°C respectivement. La plus faible teneur est observée à 120°C avec 3.35±0.001, cette diminution est probablement due à la dégradation des caroténoïdes sous l'effet de la température **(Parada et Aguilera, 2007)**.

On déduit que les hautes températures et les fortes puissances de radiations ne permettent pas de préserver les caroténoïdes par rapport à leurs teneurs qui est de 8.591mg/100g de la carotte pourpre fraiche.

IV.3.6. Evolution des paramètres de la couleur

Les résultats obtenus pour les trois paramètres de la couleur L^*, a^*et b^* à partir d'un colorimètre sont présentées dans le tableau V.

Tableau V. Valeurs des trois paramètres de couleur obtenus

Poudres de carotte	L^*	A^*	b^*
900W	62,36	6,85	23,7
600W	64,28	6,51	22,41
450W	58,62	14,2	13,82
300W	55,08	21,26	21,56
180W	50,7	15,76	10,17
120°C	61,67	6,01	13,45
100°C	58,77	15,43	16,83
90°C	59,41	17,47	24,96
80°C	51,31	17,5	26,04
60°C	69,57	8,9	8,89
40°C	53	24,45	22,66

Les résultats obtenus pour les différentes couleurs des poudres de la carotte séchée au micro-onde ainsi qu'à l'étuve, sont identifiés à partir d'un logiciel (Open RGB) lié au colorimètre, sont illustrés dans le tableau VI (voir Annexe).

Les poudres traitées à l'étuve et microonde montrent une variabilité de couleur, ce qui indique la dégradation de la couleur des poudres. En effet, pour les microondes, les poudres obtenues montrent une dégradation graduellement en augmentant la puissance, par contre, celles obtenues à l'étuve montrent une variation aléatoire en fonction de la température. En comparant les couleurs des poudres obtenues, celles séchées par microonde montre moins de dégradations par rapport à l'ensemble des poudres obtenues à l'étuve ventilée.

IV.3.7. Caractérisation minéralogique des extraits de la carotte séchée

Les diffractogrammes ci-après illustrent les différents minéraux présents dans les poudres séchées par les deux types de séchage.

A) Par micro-onde

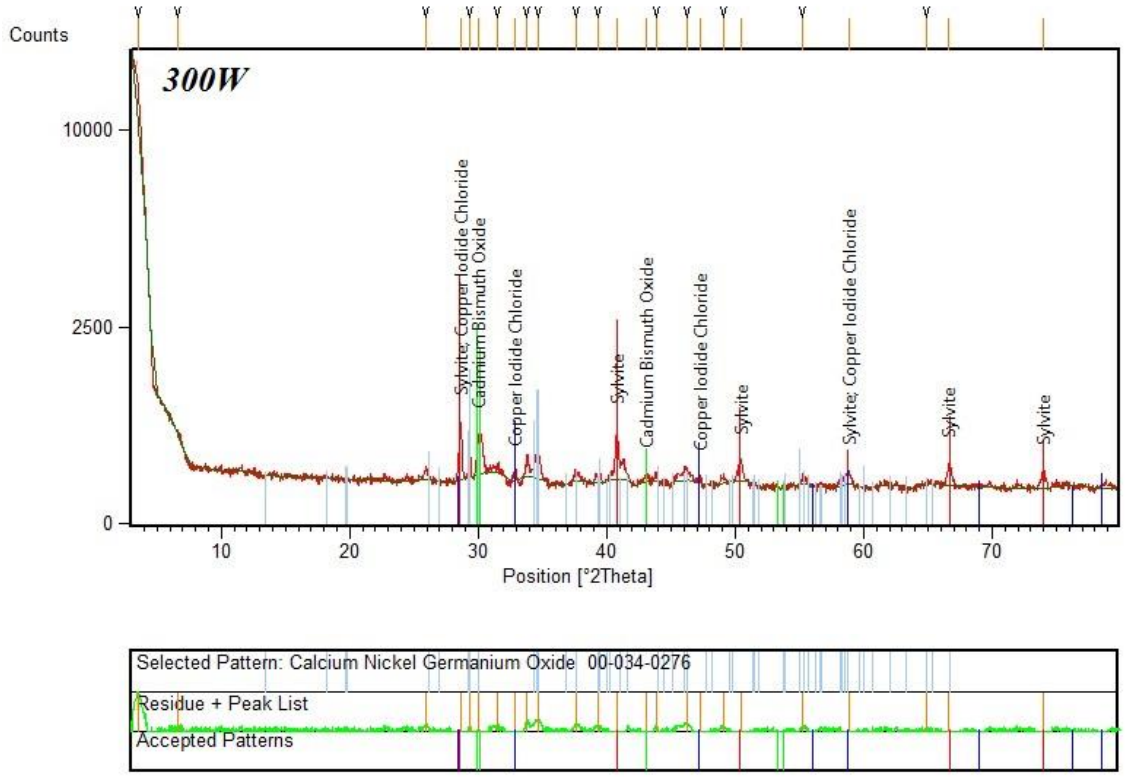


Figure 30. Composition minérale de la poudre de carotte séchée au micro-onde.

La figure 30 représente le diffractogramme de la composition minérale des poudres de carottes séchées par micro-onde à 300 W. Le séchage par micro-onde de la carotte à 300W montre la présence de plusieurs pics en différentes positions avec un pic de forte intensité en position 29 (3000 cm^{-1}). Le minéral majoritaire présent dans la poudre de carotte séchée par micro-onde est la Sylvite qui est un minéral de la famille du chlorure.

B) Par étuve

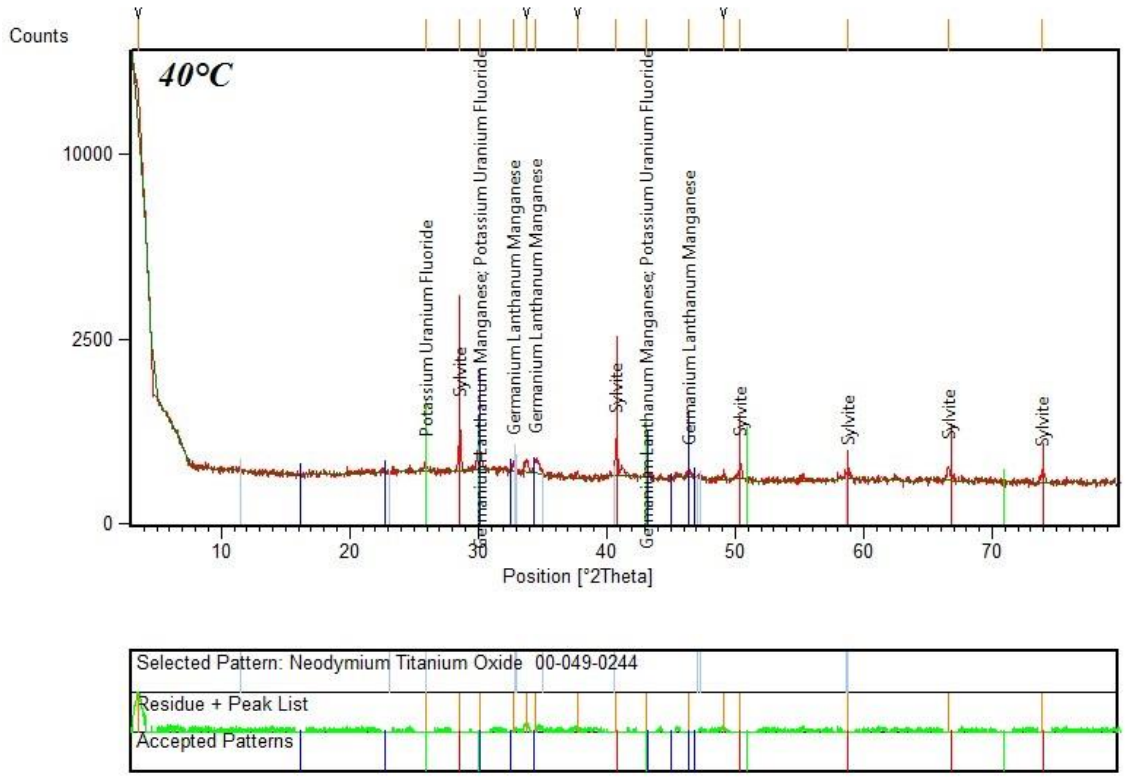


Figure 31. Composition minérale de la poudre de carotte séchée à l'étuve.

La figure 31 représente le diffractogramme de la composition minérale des poudres de carottes séchées par étuve à 40°C. Le séchage par étuve de la carotte à 40°C montre la présence de plusieurs pics en différentes positions avec un pic important en position 29 avec une forte intensité (3000 cm^{-1}). Le minéral majoritaire présent dans la poudre de carotte séchée par étuve est la sylvite.

On constate, donc, qu'il n'y a pas de différence en termes de composition minérale des poudres de la carotte séchée par micro-onde et étuve.

Conclusion

La carotte est le légume le plus couramment utilisé par l'homme pour la nutrition. En raison de la richesse de son contenu vitaminique et minéral, et d'autres nutriments précieux. Elle est utilisé fraiche ou séchée ainsi que sous forme de poudre dans les pâtisseries et les sauces.

Au fil du temps on utilise la chaleur solaire comme méthode de séchage agricole et industriel, cependant, il existe divers techniques de déshydratation de fruits et légumes. En effet ce présent travail s'intéresse à l'étude comparative des procédés de séchage et l'influence de ces derniers sur la quantité phénolique de la carotte ainsi que son activité antioxydante.

Les cinétiques de séchage montrent qu'avec les méthodes innovantes du séchage assistées par micro-onde, notre légume (carotte) se déshydrate plus rapidement par rapport à la méthode conventionnelle. Avec la plus petite puissance utilisée au micro-onde (180W), pendant seulement 17 min pour stabiliser le poids de 50 g d'échantillon frais pour arriver à 4,743 g, par contre pour l'échantillon séché à 40 °C à l'étuve il a fallu 8h et 25 min pour stabiliser le même poids d'échantillon à 5,260 g. Pour la forte puissance du micro-onde (900W) 13 min ont été suffisantes pour déshydrater 50 g de carotte, par contre à l'étuve il a fallu 2h et 75 min.

Pour le dosage des PPT le rendement optimal est attribué au séchage à l'étuve avec 10,78mg Eq AG/g de MS; cette valeur est attribuer à la température de 80°C par contre pour le séchage avec la méthode innovante assistée par micro-onde le taux le plus élevée est de 7.31 mg Eq AG/g de MS est attribuer à la puissance 180 W, cette teneur reste moins importante par rapport à la teneur obtenue à l'étuve.

D'autre part les résultats de dosage des flavonoïdes montrent que la teneur en flavonoïde qui est de 0.740 mg Eq R/g MS, revient à la puissance 300 W et la teneur optimal pour l'étuve est attribuer pour la température (80°C).

.

Pour l'activité anti-radicalaire à l'ABTS, l'activité la plus élevée est de 71 ,455% obtenue avec le séchage par micro-onde à 450 W, qui reste presque proche de la valeur obtenue pour le séchage à l'étuve (80 °C) qui est de 70.422%.

Concernant l'activité antiradicalaire au radical DPPH•, l'activité la plus élevée est obtenue avec le séchage par micro-onde à 180 W (54.40%), suivie du séchage à l'étuve (80 °C) avec un pourcentage d'inhibition de 47.238%. Cependant l'activité la plus élevée est obtenue avec le séchage par micro-onde à 400W (70.71%).

Pour les caroténoïdes le rendement optimal est attribué au séchage par étuve avec une teneur de 7.294 g/100g à (40 °C), suivi d'une teneur si proche ($p<0.05$) qui est de 7,274 g/100g à 180W par rapport à sa teneur dans la carotte fraiche.

Cette étude nous a permis de mieux comprendre l'influence du séchage (micro-onde, étuve) sur la composition phytochimiques des poudres obtenues. A la lumière de cette recherche, on déduit que le séchage par micro-onde est plus favorable, d'une part le temps de séchage est beaucoup plus court par rapport au séchage à l'étuve. Et d'autre part en termes de rendement sur la composition phénolique, le séchage par micro-onde donne une meilleure rentabilité que celle de l'étuve.

Tout fois, comme complément à la présente investigation, les points suivants nous semblent pertinents :

- ✓ L'utilisation de techniques d'analyses plus performantes telles que HPLC, la RMN, etc. pour l'identification de la composition des extraits ;

L'évaluation de l'activité antimicrobienne des différents extraits étudiés ;

- ✓ . Optimisation et modélisation des processus de séchage assistés par microonde et conventionnel ;
- ✓ Développement de la technique de prétraitement de séchage assistée par les ultrasons.

Nous suggérons aussi, de prévoir un appareillage bien dimensionné et sophistiqué en fonction d'un ensemble de produits à sécher, notamment les produits en surproduction qui demandant ce type de traitement.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

-A-

Akyıldız A, Aksay S, Benli H, Kıro_glu F, Fenercio_glu H. (2004). Determination of changes in some characteristics of persimmon during dehydration at different temperatures. Journal of Food Engineering 65, 95–99.

Al Haddad M. (2007). Contribution théorique et modélisation des phénomènes instantanés dans les opérations d'autovaporisation et de déshydratation**,** Université de La Rochelle.

Alasalvar C, Grigor J. M, Zhang D, Quantick P. C. et Shahidi F. (2001). Comparison of Volatiles, Phenolics, Sugars, Antioxidant Vitamins, and Sensory Quality of Different Colored Carrot Varieties**.** Journal of Agricultural and Food Chemistry 49:1410‑1416.

Alibas Ozkan, I, Akbudak, B, et Akbudak, N. (2007). Microwave drying characteristics of spinach. Journal of Food Engineering, 78(2), 577–583.

Alibas I. (2007). "Microwave, air and combined microwave–air-drying parameters pumpkin slices." LWT - Food Science and Technology 40(8): 1445-1451.

AmadoN. G, Fonseca B.F, et al. (2011). "Flavonoids: potential Wnt/beta-catenin signaling modulators in cancer." Life Sci 89(15-16): 545-554.

Antoine Edouard Degrou. (2013). Etude de l'impact des procedes de transformation sur la diffusion des caroténoïdes : cas du lycopene de la tomate. Agricultural sciences. Universite d'Avignon,2013. French.

Aubert S, et Bonnet A. (1977). Intérêt alimentaire des Ombellifères - Exemple de la carotte. In: Cauwet-Marc A.-M. et Carbonnier J. (eds). Les Ombellifères - Contributions pluridisciplinaires à la systématique: 809‑822. Actes du 2e symposium international sur les Ombellifères, 18 mai 1977, Perpignan, France.

-B-

Barat J, Paran G, et Bernabé C. (2012). La carotte de consommation, bilan de compagne 2010/2011, unité Cultures et filières spécialisées / direction Marchés, études et prospective: 4-8.

Benhammou N. (2012). Activité antioxydante des extraits des composés phénoliques de dix plantes médicinales de l'Ouest et du Sud-Ouest Algérien.

Bertram J. S, and A. L. Vine. (2005). "Cancer prevention by retinoids and carotenoids: independent action on a common target." Biochim Biophys Acta 1740(2): 170-178.

Bessaoud S. (2015). Evaluation de quelques paramètres de la balance oxydants/antioxydants chez des rats diabétiques recevant de la quercétine.

Bimbenet J. J, Duquenoy A, et Trystram G. (2002). Génie des procédés alimentaires: des bases aux applications. Dunod.

Bonazzi, C, et Bimbenet J. J. (2003). Séchage des produits alimentaires principe. Techniques de l'Ingénieur. Opérations unitaires du génie industriel alimentaire. Base documentaire : TIB430DUO (ref : article : f3000)].

-C-

Chaux C, et Foury C. (1994). Productions légumières - Tome 2 : Légumes feuilles, tiges, fleurs, racines, bulbes. Éditions Tec & Doc, Paris, 639 p.

Charles M. Benbrook. (2005). « Accroître la teneur des antioxydants des aliments grâce à l'agriculture et à la transformation alimentaire et biologiques », The Organique Center.

Chemat F, Tomas V et Virot M, (2008). Ultrasound-assisted extraction in food analysis.Handbook of food analysis instrument: 85-103.

Chu Y. F, Sun J, Wu X. Z, et Liu R. H. (2002). Antioxidant and anti-proliferative activities of common vegetables. Journal of Agricultural and Food Chemistry,

50(23), 6910–6916.

Clotault J, Peltier D, Berruyer R, Thomas M, Briard M et Geoffriau E. (2008). Expression of carotenoid biosynthesis genes during carrot root development. Journal of Experimental Botany 59: 3563‑3573.

Clotault J. (2009). Impact de la sélection sur l'expression et la variabilité de séquences de gènes de la voie de biosynthèse des caroténoïdes chez la carotte cultivée. Thèse de doctorat.Université d'Angers, Angers, 183 p.

-D-

Dahmoune F, Boulekbache L, Moussi K, Aoun O, Spigno G et Madani K. (2013). Valorization of Citrus limon residues for the recovery of antioxidants:Evaluation and optimization of microwave and ultrasound applicationto solvent extraction. Industrial Crops and Products 50,77– 87.

Dairi S, Madani K, Aoun M, Kee Him J.L, Bron P, Lauret C, Cristol J-P and Carbonneau M-A. (2014). Antioxidative Properties and Ability of Phenolic Compounds of Myrtus Communis Leaves to Counteract In Vitro LDL and Phospholipid Aqueous Dispersion Oxidation. Journal of Food Science, doi: 10.1111/1750-3841.12517.

Dalton S. (2002). Encyclopedia of foods: a guide to healthy nutrition, lww.

Daudin J. D. (1983). Calcul des cinétiques de séchage par l'air chaud des produits biologiques solides. Sciences des Aliments, 14 (10), 1-36.

Dewanto V, Wu X, Kafui K. A and Liu R.H. (2002). thermal processing enhances the nutritional value of tomatoes by increasing total antioxidant activity. j. agric. food chem, 50, 3010-3014

Downham A, et Collins P. (2000). Colouring our foods in the last and next millennium.International Journal of Food Science & Technology 35: 5–22.

Downie S. R, et Katz-Downie D. S. (1996). A Molecular Phylogeny of Apiaceae Subfamily Apioideae: Evidence from Nuclear Ribosomal DNA Internal Transcribed Spacer Sequences. American Journal of Botany 83: 234‑251.

-F-

Fokone, A. T, M. Edoun et al. (2013). "Modélisation de la Cinétique de Séchage de la Carotte (Daucus carota)[Modeling of Drying Kinetics of Fresh Carrot (Daucus carota)]."

-G-

Gardeli C, Papageorgiou V, Mallouchos A, Theodosis K et Komaitis M. (2008). Essential oil composition of Pistacia lentiscus L. and Myrtus communis L.: evaluation of antioxidant capacity of methanolic extracts. Food Chem. 107: 1120–1130.

George S, Brat P, Alte P and Amiot M. J. (2005). Rapid Determination of Polyphenols and Vitamin C in Plant-Derived Products. J. Agric. Food Chem., 53, 1370 1373.

Guersson N. 2004. Les nouvelles mesures en matière de réglementation : l'étiquetage des denrées alimentaires.

Gonny M, Bradesi P et Casanova J. (2004). Identification of the components of the essential oil from wild Corsican Daucus carota L. using 13C-NMR spectroscopy. Flavour and Fragrance Journal 19: 424–433.

-H-

Harisoamahefa H. (2013). Etude des modalites de sechage de fruits et legumes au moyen du sechoir solaire boara; Qualites nutritionnelles et microbiologiques des produits obtenus, Universite d'Antananarivo Faculte des Sciences, 41 p.

Hiranvarachat B, Devahastin S, Chiewchan N et Raghavan G.S.V. (2013). Structural modification by different pretreatment methods to enhace microwave assisted extraction of β-carotene from carrots. Journal of Food Engineering 115, 190-197.

Hossain MA, Bala BK et Satter MA. (2003). Simulation of natural air drying of maize incribs. Simulation Modelling Practice and Theory, 11(7–8):571-583.

Hurst W. J. (2008). Methods of analysis for functional foods and nutraceuticals, CRC Press.

-I-

ITCMI. (2010). Fiche techniques valorisée des cultures maraîchères et Industrielles: la culture de carotte ,2-3.

-J-

Jean-Jacques B, Catherine B. (2003).Séchage des produits alimentaires Principes Techniques de l'ingénieur Opérations unitaires du génie industriel alimentaire, base documentaire : TIB430DUO (ref. article : f3000).

Jean V. (2011). Séchage Industriel : Principes et calcul d'appareils autre modes de séchage que l'air chaud (partie1).Techniques de l'ingénieur opérations unitaires : evaporation et séchage, base documentaire : TIB 316 DUO (ref.article : j2453).

-K-

Ketata M, Boudhrioua N, Ammar E et Kechaou N. (2010): Etude Du Séchage Par Micro-Ondes Et Des Isothermes De Sorption Des Feuilles De Pelargonium Graveolens D'origine Tunisienne Et Marocaine. Food Chemistry, 125(3):851-858.

Khennouf S, Iratni N, Baghiani A, Harzallah D et andArrar L. (2010). Antioxidant and antibacterial activities of extracts from Artemisia herba alba Asso. Leaves and some phenolic compounds. Journal of Medicinal Plants Research Vol. 4(13), pp. 1273-280.

Kivçak B and Akay S. (2005). Quantitative determination of a- tocopherol in pistacia lentiscus, Pistacia lentiscus var .chia, and Pistacia tserebinthus by TLC-densitometry and colorimetry.Fitoterapia, 76:62-66.

Klimczak I, Malecka M, Szlachta M et Anna Gliszczynska-Swiglo. (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, 313–322.

-*L*-

Labbé D. (2008). "Les flavonoïdes d'origine alimentaire et le cancer: inhibition de l'angiogenèse tumorale et du potentiel invasif des médulloblastomes."

Lee J, Robert W. Durst, And Ronald E et Wrolstad. (2005). Determination of Total Monomeric Anthocyanin Pigment Content of Fruit Juices, Beverages, Natural Colorants, and Wines by the pH Differential Method: Collaborative Study. journal of AOAC internationaL Vol. 88, NO. 5, 1269-1278.

Lee D, Kim N et Lee S. (2001). 2, 2-Dipheny1-1- picrylhydrazyl Hydrate, a Stable Free Radical, Is an a-Glycosidase Inhibitor, J Biological & pharmaceutical bulletin, Volume 24, No 6, pp 727-728.

Le Clerc V. (2001). Etude de la diversité génétique chez la carotte (Daucus carota L.): mise au point de stratégies d'analyse et de régénération des ressources génétiques. Thèse de doctorat. Université d'Angers, Angers, 125 p.

Li Z, Raghava G.S.V et Orsat, V. (2010). Temperature and power control in microwave drying. Journal of Food Engineering, 97(4), 478-483.

Linden G, et Lorient D. (1994). Biochimie agro-industrielle : valorisation alimentaire de la production agricole. Paris -Milan-Barcelone: Masson. pastel-00771870, version 1-9 Jan 2013.

Liu Z. Y, Hu X. L, Bu F. Q, Ding L. et Zhang H. Q. (2007). Studies on the chemical change in the process of microwave-assisted extraction of flavonoids from Acanthopanax senticosus harms. Chemical Journal of Chinese Universities, 28: 431-435.

-*M*-

Maiani, Castón, Catasta,Toti, Cambrodón, Bysted, Granado-Lorencio et al. (2009). Carotenoids: actual knowledge on food sources, intakes, stability and bioavailability and their protective role in humans. Molecular nutrition & food research, 53 Suppl 2, S194-218.

Maskan M. (2001): Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. Journal of Food Engineering, 48(2):169-175.

Mpiana P, Balanganayi E, et al. (2009). "Activité antidrépanocytaire et thermodégradation des anthocyanes extraits de Sterculia quinqueloba et Ficus capensis." International Journal of Biological and Chemical Sciences 3, no 3.

-*N*-

Nicol M. and M. Maudet. (2000). "Caroténoïdes et vitamine A. Actualités." Oléagineux, Corps gras, Lipides 7(3): 266-270.

Nout R, Hounhouigan J et Boekel T.V. (2003). Les aliments transformations conservations et qualités. 263p.

-*O*-

Ozkan I. A, B. Akbudak et al. (2007). "Microwave drying characteristics of spinach." Journal of Food Engineering 78(2): 577-583.

-*P*-

Palé É, M. Kouda-Bonafos et al. (2004). "Caractérisation et mesure des activités anti-radicalaires d'anthocyanes de plantes du Burkina Faso." Comptes Rendus Chimie 7(10-11): 973-980.

Parada et Aguilera. (2007). Food microstructure affects the bioavailability of several nutrients. Journal of food science, 72(2), R21-32

Perkin R. M. (1980). The heat and mass transfer characteristics of boiling point drying using radio frequency and microwave electromagnetic fields. International Journal of Heat and MassTransfer, 23(5), 687-695.

Péroumal A. (2014). Caractérisation des fruits et de la pulpe de six accessions de Mammeaamericana: Aptitude à la transformation des fruits et caractérisation des composés phénoliques de la pulpe, Université des Antilles-et de la Guyane, 83 p.

Prakasha S, Jhab S.k et Datta N. (2004). Performance evaluation of blanched carotte dried by three diffrent driers. Journam of Food Engineering, 62, 305-313.

-*R*-

Ramboatiana F. (2010). Contribution de l'utilisation de fruits séchés comme support de remèdes homéopathiques : cas de la purée de papaye séchée. Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur Agronome Option Industries Agricoles et Alimentaires.

Roberta R, Pellegrini N, Proteggente A, Pannala A, Yang M and catherine R E. (1998). antioxidant activity applying an improved abts radical cation decolorization assay. Free Radical Biology & Medicine, Vol. 26, PII S0891-5849, 00315-3.

Rougier, C. (2003). Etude des interactions entre la bactérie Escherichia coli et les microondes appliquées en mode discontinu dans des conditions faiblement thermiques. Thèse de l'Université de Limoges.

-*S*-

Singh R. P, et Heldman D. R. (2001). Introduction to Food Engineering, Third Edition. London UK: Academic Press.

Small E. (1978). A numerical taxonomic analysis of the Daucus carota complex. Canadian Journal of Botany 56: 248‑276.

Staniszewska M, Kula J, Wieczorkiewicz M et Kusewicz D. (2005). Essential Oils of Wild and Cultivated Carrots—the Chemical Composition and Antimicrobial Activity. Journal of Essential Oil Research 17: 579‑583.

Sun T, Simon P. W. et Tanumihardjo S. A. (2009). Antioxidant Phytochemicals and Antioxidant Capacity of Biofortified Carrots (Daucus carota L.) of Various Colors. J. Agric. Food Chem. 57: 4142‑4147.

-*T*-

Tirilly Y, et Bourgeois C.-M. (1999). Technologie des légumes. Éditions Tec & Doc,558 p.

Tomas –Barbera F. A, et Espin J. C. (2001). Phenolic compounds and related enzymes as determinants of quality in fruits and vegetables. Journal of the Science of food and Agriculture, 81:853-876.

-*V*-

Vinson J. A, Hao Y, Su X. H, et Zubik L. (1998). Phenol antioxidant quantity and quality in foods: Vegetables. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 46(9), 3630–3634.

-*Z*-

Zhang D. and Y. Hamauzu. (2004). "Phenolic compounds and their antioxidant properties in different tissues of carrots (Daucus carota L.)."

Zozio S, D. Pallet, et al. (2011). "Evaluation of anthocyanin stability during storage of a coloured drink made from extracts of the Andean blackberry (Rubus glaucusBenth.), açai (Euterpe oleraceaMart.)and black carrot (Daucus carotaL.)." Fruits 66(3): 203-21

Annexe I :

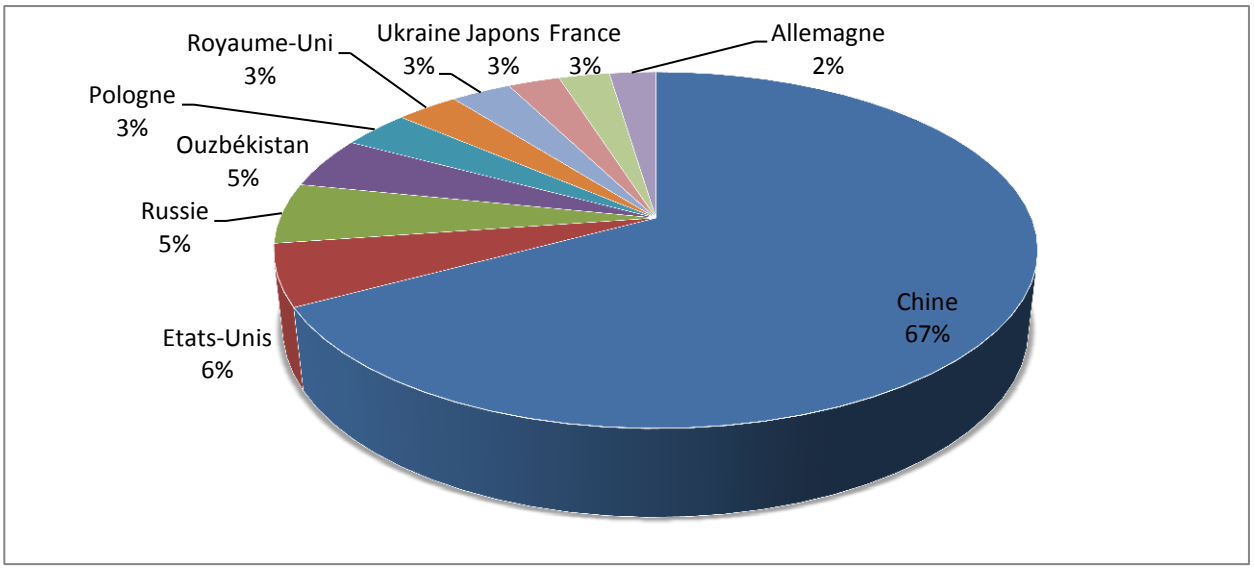


Figure 6. Premiers pays producteurs de carotte en 2010**(Julie Barat, Ghislaine Paran et Claudie Bernabé, 2012).**

Annexe II : Préparation de l'ABTS

Une solution d'ATBS à 7 mM et 2,45 mM persulfate du potassium est préparée dans 25 ml d'eau distillée, cette solution est incubée à l'obscurité pendant 12-16 heures à température de 4°C avant d'être utilisée. Cet intervalle de temps permet la formation du radical ABTS+**. .**

La solution ainsi obtenue est bleu verte et stable. La solution concentrée d'ABTS a été diluée avec de l'éthanol à 95% pour avoir une solution d'absorbance finale de 0,70±0,002 à 734 nm.

Annexe III : Courbes d'étalonnage

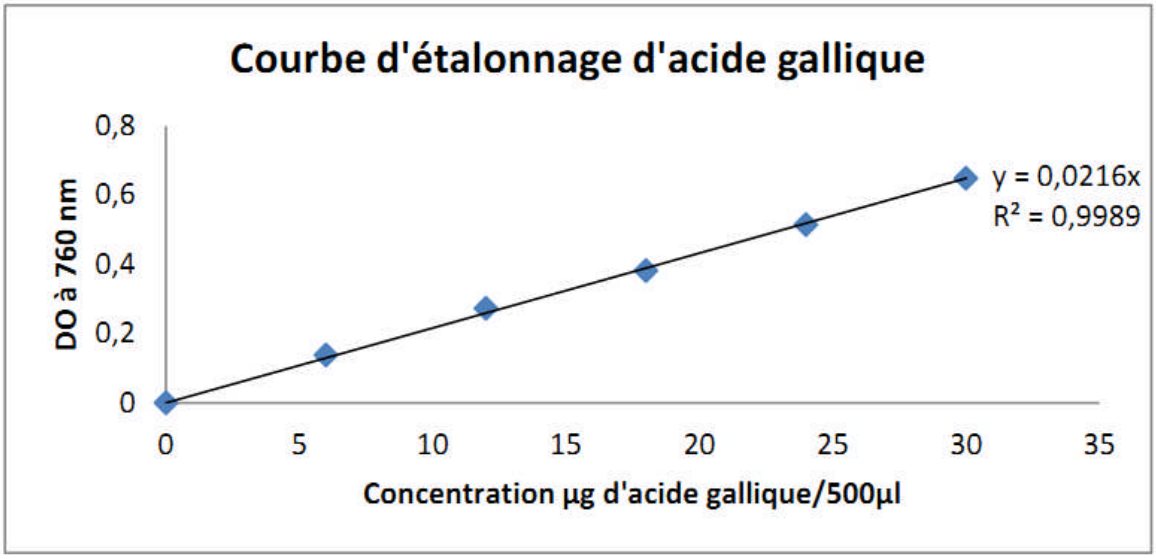


Figure 1. Courbe d'étalonnage de l'acide gallique.

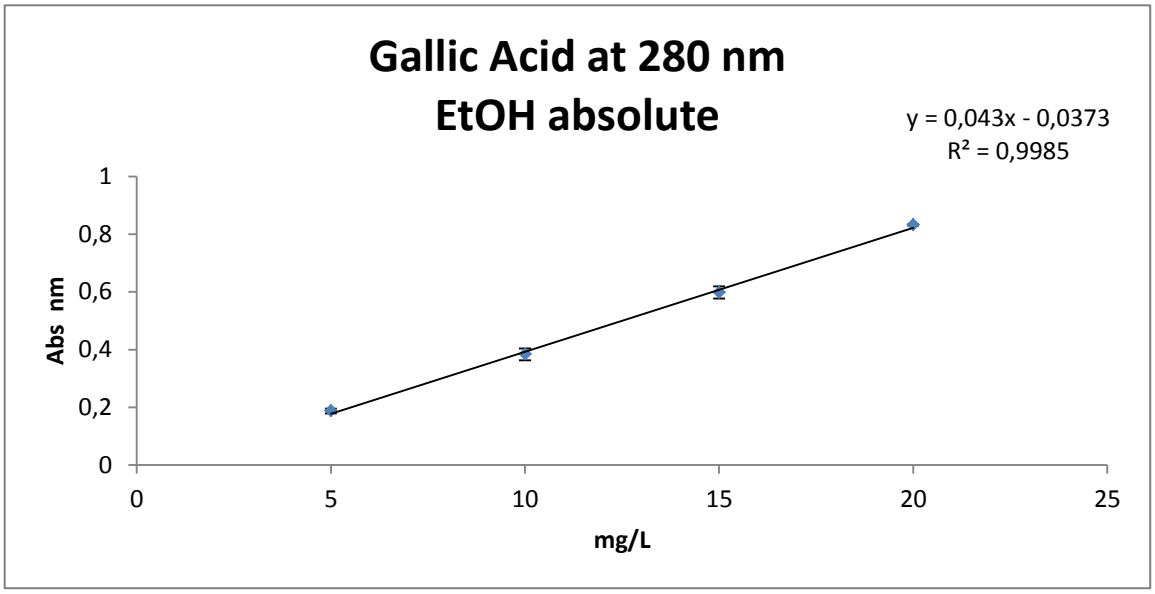


Figure 2. Courbe d'étalonnage de l'acide gallique à 280 nm

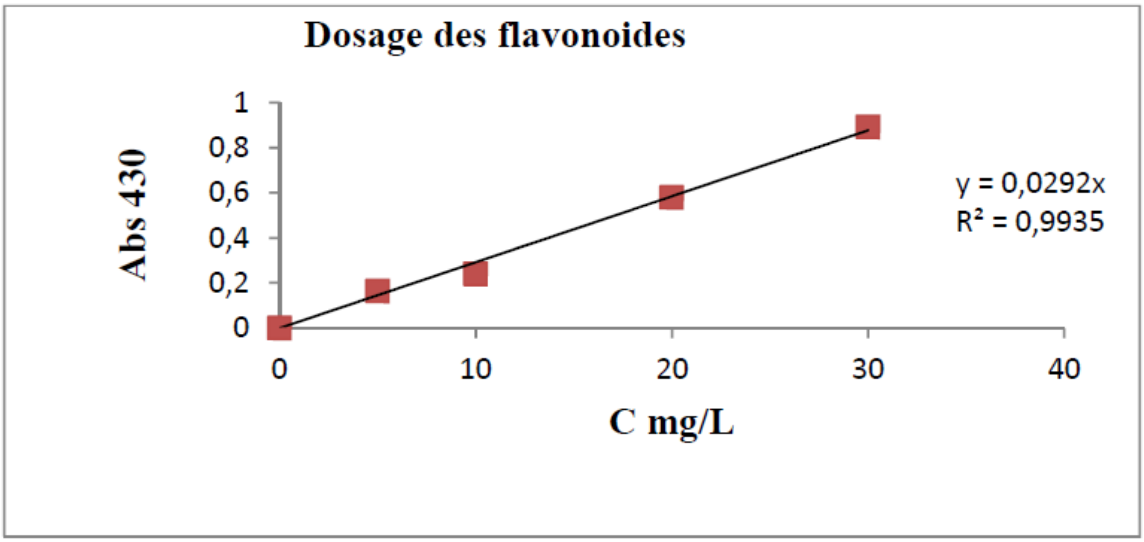


Figure 3. Courbe d'étalonnage de la rutine

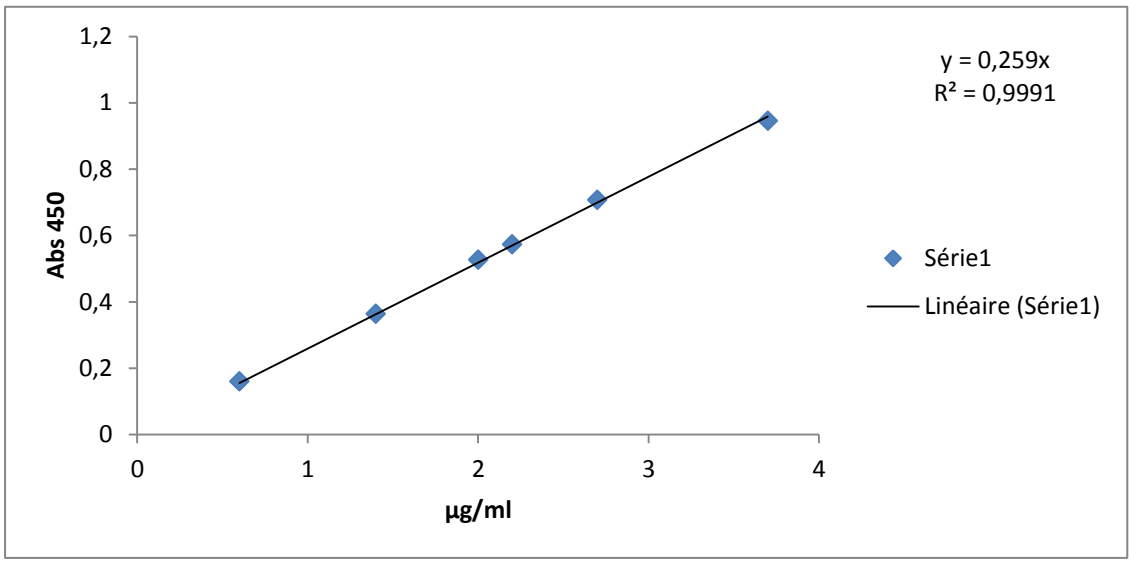
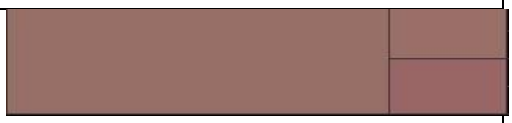


Figure 4. Courbe d'étalonnage de bêta-carotènes

Annexe IV :

Tableau VI. Couleurs des poudres de carotte séchée au micro-onde et étuve.

Puissances	**Couleur identifie**
180W	
300W	
450W	
600W	
900W	
TEMPERATURE	**COULEUR Identifié**
40°C	
60°C	
80°C	
90°C	
100°C	
120°C	

Résumé

Deux méthodes de séchage ont été utilisées dans ce présent travail afin de comparé leurs effets sur la matrice végétale (*Daucus Carota*). Cette étude a été réalisée à l'aide d'un micro-onde à plusieurs puissances (180W à 900W) et d'une étuve ventillée à différentes températures (40°C à 120°C). Des cinétiques de séchage ont été effectuées en fonction de la perte de masse au court du temps. L'évaluation de la composition phyto-chimique, minérale ainsi que l'activité anti-oxydante des différents échantillons ont été analysés. Les cinétiques étudiées ont montrés que la stabilité du poids des échantillons est atteinte à un temps beaucoup plus court avec le séchage par micro-onde (900 W/12 min) qu'avec le séchage par étuve (120°C/165min). La méthode du Folin-Ciocalteu et l'indice des polyphénols à 280 nm donnent rendement optimal en Polyphénols totaux (PPT) à la température de 80°C par étuve de ce fait l'étude de l'activité antioxydante a confirmé les résultats obtenus. La méthode de séchage assistée par micro-onde est recommandée pour la préparation rapide, économique et fiable des matrices contenants des substances à haute valeur ajoutée.

Mots-clés: Carotte (*Daucus carota)*, caroténoïdes, polyphénols, micro-onde, étuve ventilée, cinétique de séchage, , activité antioxydante.

Abstract

Two drying methods, (innovative and conventional) were carried out using a microwave and a ventilated oven apparatus in order to compare the bioactive compounds contained in the carrot (*Daucus carota*). The drying kinetic was achieved through monitoring of mass loss versus time. The phytochemical and mineral composition as well as the antioxidant activity of the different samples were analyzed. The kinetic study showed that the stability of the sample weights using the drying microwave (900 W/12 min) was shorter than the drying oven (120°C/165min). The folin-Ciocalteu and the polyphenol index at 280 nm takes an Total Polyphénols optimum yield at 80°C (ventilated oven), however, the study of the antioxydant activity confirms the obtained results. Microwave-assisted drying method is recommended for fast, economical and reliable preparation matrix that containing the high added-value compounds.

Key words: Carrot (*Daucus carota)*, carotenoids, polyphenols kinetic drying, microwave, ventilated oven, antioxydant activity.