

**Réf :.....**

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

**MASTER**

*Thème*

**Suivi de la cinétique de séchage par micro-onde  
et étuve du navet « *Brassica rapa* »**

Présenté par :

**Bedjaoui Sara & Kaid Narimane**

Soutenu le :

Devant le jury composé de :

Dr NABET Nacim

Pr MADANI Khodir

Dr MEKHOUKHE Aida

Melle GUEMOUNI Sara

MCA

Professeur

MCB

Doctorante

Président

Encadreur

Examinatrice

Co- encadreur

## DEDICACES

*Je voudrais dédier ce modeste travail de ce mémoire à :*

- *A titre posthume à mon grand père paternel et a mon cousin abderahmane et tous les valeureux et glorieux martyrs qui se sont sacrifiés pour notre patrie , pour que nous puissions aujourd'hui, vivrent, et étudier dans notre pays libre et indépendant .*
- *A tout le peuple algérien et sa jeunesse et en particulier toute la communauté universitaire (enseignants, étudiants, personnel.....), qui depuis le 22 février mènent nationalement, une révolution pacifique pour l'amélioration de la gouvernance en Algérie et pour l'édification d'un état de droit et de justice sociale, et pour l'émancipation de la démocratie et du progrès social.*
- *A mes chers parents , à mes chères sœurs , katia, naima et wissal , à mon cher frere larbi, à mes cousins et cousines , à mes chers tantes paternelles et maternelles , chacun et chacune par son nom et particulièrement à mon oncle Saïd.*
- *A ma chère grand mère paternelle, et grands parents maternels, disparus mais qui sont toujours vivants dans ma mémoire, à qui je rends hommage en leur dédiant ce mémoire.*
- *A toutes mes amies et à tous les camarades de la section QPSA , et à tous les étudiantes et étudiants de l'université du **Chahid Abderahmane MIRA de Bejaia.***

*BEDJAOUI Sara*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à :*

*A ma raison de vivre, Mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour.*

*Mes chères sœurs Nawel, Fouzia, Kahina, Naima, Wissam, Lili et leurs maris Hamid, Saadan, et Billal et en particulier à Riad.B à mon unique adorable frère Sofiane et sa femme Nawel.B , à mes nièces Youva, Zohir, Chiraz, Chanel, Aylan et la petite Anaïs .*

*A mon cher ami Hamid.B que dieu illumine ton chemin*

*A toute ma famille à tous mes amis que j'adore*

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

*A toute la promotion de contrôle des produits et sécurité des aliments*

*Kaid Narimane (Mimane)*

# Remerciements

*Avant tout, nous remercions DIEU le tout puissant de nous avoir donné la force et courage afin que nous puissions accomplir ce travail.*

*Nous tenons à exprimer nos plus vifs remerciements à Mr **MADANI K.** Professeur à l'Université de Bejaia pour la confiance, et tous les encouragements qu'il nous a témoigné en acceptant l'encadrement de notre mémoire. Nous le remercions particulièrement pour la confiance qu'il nous a accordée, pour sa rigueur scientifique, pour sa patience et pour ses conseils judicieux qui ont contribué à la réalisation et à l'accomplissement de ce travail.*

*Nous tenons à exprimer nos remerciements à Monsieur **Dr NABET N.** à l'Université de Bejaia, qui nous a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury. Qu'il trouve ici l'expression de notre profonde gratitude.*

*Nous tenons aussi à remercier Madame **Dr MAKHOUKHE A.** à l'Université de Bejaia, pour son évaluation de ce travail.*

*Aussi, on voudrait sincèrement exprimer notre profonde gratitude pour **Melle GUEMOUNI S., Melle DJAOUD K. et Mr HAMDI M.** pour leur aide précieuse notamment dans le suivi pratique et théorique. On les remercie également pour leurs conseils et encouragements incessants. Leurs sens de valeur humaine et leurs esprit scientifique qui nous a conduits à la réussite de ce travail et il va de soit que nous tenons aussi à remercier tous les enseignants de département de qualité des produits et sécurité des aliments, pour leurs soutiens et précieux encouragements.*

*Pour finir, on souhaite remercier nos famille, nos proches, nos amis d'avoir toujours cru en nous et de nous avoir soutenu tout au long de ce projet.*

**KAID Narimane et BEDJAOUI Sara**

## Liste des tableaux

<b>Tableau I :</b> La composition chimique du navet	6
<b>Tableau II :</b> Modèle empirique de séchage en couche mince	26
<b>Tableau III :</b> Paramètres de modélisation de la cinétique de séchage par étuve	29
<b>Tableau IV :</b> Paramètre de la modélisation de la cinétique de séchage par micro-onde	34
<b>Tableau V :</b> Coefficients de détermination ( $R^2$ ) avec et sans les valeurs aberrantes	35
<b>Tableau VI :</b> Les points éliminés	36

## Liste des figures

<b>Figure 01</b> : Navets blanc	3
<b>Figure 02</b> : Représentation de la plante <i>brassica rapa</i>	5
<b>Figure 03</b> : Les différentes variétés du navet	8
<b>Figure 04</b> : Photographie d'une étuve universelle ventilée	13
<b>Figure 05</b> : Schéma d'un four à micro-onde	15
<b>Figure 06</b> : évolution de taux d'humidité de séchage en Fonction du temps	17
<b>Figure 07</b> : évolution de vitesse de séchage en Fonction du temps	17
<b>Figure 08</b> : photographie de navet frais	21
<b>Figure 09</b> : Evaluation de la perte de masse en fonction de couple temps – température	24
<b>Figure 10</b> : Evaluation de la perte de masse en fonction de couple temps – puissance	25
<b>Figure 11</b> : Modèle exponentielle de polynôme T = 60 °C	27
<b>Figure 12</b> : Modèle exponentielle T = 60 °C	27
<b>Figure 13</b> : Modèle exponentielle de polynôme T = 80 °C	28
<b>Figure 14</b> : Modèle exponentielle T = 80 °C	28
<b>Figure 15</b> : Modèle exponentielle de polynôme P = 200 W	29
<b>Figure 16</b> : Modèle exponentielle P = 200 W	30
<b>Figure 17</b> : Modèle exponentielle de polynôme P = 400 W	30
<b>Figure 18</b> : Modèle exponentielle P = 400 W	31
<b>Figure 19</b> : Modèle exponentielle de polynôme P = 600 W	31
<b>Figure 20</b> : Modèle exponentielle P = 600 W	32
<b>Figure 21</b> : : Modèle exponentielle de polynôme P = 800 W	32
<b>Figure 22</b> : Modèle exponentielle P = 800 W	33
<b>Figure 23</b> : modèle polynome sans valeurs aberrantes pour P = 400 W (a) et 800 W (b)	34
<b>Figure 24</b> : Teneur en eau navet frais et de la poudre séché	36
<b>Figure 25</b> : Teneur en polyphénols totaux des extraits de navet séché au micro-onde et étuve	37
<b>Figure 26</b> : pourcentage d'inhibition de DPPH des extraits de navet séchée au micro-onde et à l'étuve	39
<b>Figure 27</b> : pouvoir réducteur des extraits de navet séchées au micro-onde et étuve	40

## Liste d'abréviations

**ABS** : Absorbance.

**DPPH**: Acide 2,2-azinobis-3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic.

**E.A.G** : Equivalent d'acide gallique.

**PPT** : Polyphénols totaux.

**MF** : Matière fraîche.

**TH** : Taux d'humidité.

**TPC** : Total phenolic compound.

**pH** : Potentiel hydrogène.

**ET** : Trolox

# Table des matières

<b>Dédicaces</b>	<b>i</b>
<b>Remerciements</b>	<b>ii</b>
<b>Table des tableaux</b>	<b>iii</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>iv</b>
<b>Liste des abréviations</b>	<b>x</b>

<b>Introduction</b>	<b>1</b>
---------------------	----------

## Revue bibliographique

### Chapitre I : Généralités sur le navet

I.1. Généralités	3
I.1. La taxonomie	4
I.2. Historique	4
I.3. Descriptions de la plante	5
I.4. Composition du navet blanc	6
I.5. Les variétés	7
I.6. Les intérêts de navet	8

### Chapitre II : Généralités sur le séchage

II.1. Le Séchage	9
II.2. Principe du séchage	9
II.3. L'objectif du séchage	9
II.4. Technologie de séchage	9
II.4.1. Séchage par ébullition	10
II.4.2. Séchage par entraînement	10
II.4.3. Séchage au soleil	11
II.4.4. Séchage solaire	11
II.4.5. Séchage par étuve	12
II.4.6. Séchage par micro-onde	13
II.4.7. Lyophilisation	15

II.5. Cinétique de séchage	15
II.5.1. Période de séchage	15
II.5.1.1. Période 0 de mise en température du produit (AB)	16
II.5.1.2. Période 1 de séchage à vitesse constante	16
II.5.1.3. Période 2 de séchage à vitesse décroissante ou ralentissement (CD)	16
II.6. Mécanisme intervenant au cours du séchage	17
II.6.1. Transfert de chaleur	17
II.6.1.1. Conduction	17
II.6.1.2. Convection	17
II.6.1.3. Rayonnement	18
II.6.2. Transfert de matière	18
II.7. Phénomènes produit au cours de séchage	18
II.7.1. Réaction biochimique	19
II.7.2. Phénomène mécanique	19
II.8. Transfert physique	19

## **Partie pratique**

### **Chapitre III : Matériels et méthodes**

III.1. Préparation des échantillons	20
III. 2. Cinétique de séchage	20
III.2.1. Séchage assisté par micro-onde	20
III.2.2. Séchage assisté par étuve	21
III.3. Teneur en eau avant et après le séchage	21
III.4. Analyse phytochimique	21
III.4.1. Extraction des composés phénoliques totaux (TPC)	21
III.4.2. Dosage de composés phénolique totaux (TPC)	21
III.5. Evaluation de l'activité antioxydante	22
III.5.1. Test du DPPH	22
III.5.3. Pouvoir réducteur	22

### **Chapitre IV : Résultats et discussions**

IV.1. Cinétique de séchage	23
----------------------------	----

IV.1.1. Cinétique de séchage par étuve	23
IV.1.2. Cinétique de séchage par micro-onde	24
IV.2. Modélisation de la cinétique de séchage	25
IV.3. Modélisation après l'élimination des valeurs aberrante	33
IV.4. Teneur en eau avant et après le séchage	35
IV.5. Teneur en polyphénols totaux	37
IV.6. Evaluation de l'activité antioxydante	38
<b>Conclusion</b>	39
<b>Références bibliographiques</b>	40
<b>Annexes</b>	48

Les fruits et légumes fournissent une source d'énergie importante, ces derniers sont très riche en substances nutritives, vitamines et minéraux. Ce genre d'aliments ne reste que peu de temps consommable si on ne les conserve pas rapidement selon une méthode approprier (**Kuipers, 2003**).

Il existe plusieurs types de traitements des fruits et des légumes permettant de les stocker pendant de longues durées tout en préservant leur qualité nutritive, citons : la réfrigération, le traitement chimique et le séchage (**Youcef-Ali et al., 2008**). Ce dernier est l'un des principales techniques de préservation des produits agroalimentaires, il s'agit du processus le plus commun employé afin d'abaisser la quantité d'eau présente dans ces produits, pour que les conditions de leur stockage soient les plus favorables (**Khama, 2009**).

Cependant, il est bien connu des professionnels de l'industrie agroalimentaires que le séchage est l'opération unitaire la plus délicate, puisque les conditions du procédé exercent une forte influence non seulement sur les propriétés rhéologiques (déformation, état de surface, ...) mais aussi sur les propriétés nutritionnelles du produit à sécher (**Ngameni et al., 2004**).

Le séchage conventionnel comprend une exposition des produits alimentaires à haute température et pour de longues périodes, ce qui peut entraîner de graves dommages à la saveur, la couleur, la capacité de réhydratation et des éléments nutritifs de la matière traitée, ainsi que sur la valeur énergétique (**Dadali et al., 2007; Drouzas et al., 1999; Sharma and Prasad, 2004**). En effet, le développement de nouvelles méthodes de séchage essentielles pour la conservation des produits alimentaires qui peuvent gagner du temps, de l'énergie et de minimiser la dégradation de la qualité. Ces dernières années, le séchage par micro-ondes a gagné une popularité en tant que méthode de séchage alternative pour surmonter les effets indésirables pour une grande variété de produits alimentaires (**Bouraoui et al., 1994; Tulasidas et al., 1995**); en présentant plusieurs avantages par rapport à un séchage classique (**Sharma et Prasad, 2004**).

Le présent travail a pour objectif de répondre à la question : quelle est la méthode la plus adéquate pour sécher le navet blanc toute en préservant les composants bioactifs ?

Afin de mieux situer le contexte dans lequel s'inscrit ce travail, une partie théorique à été présentée sur le navet blanc ainsi qu'un aperçu sur le séchage. Le deuxième volet est voué à la modélisation et au suivi des cinétiques de séchage à l'étuve ventilée à différentes températures et au micro-onde à différentes puissance. Dans le but de comparer l'efficacité des deux méthodes, une évaluation de l'effet de séchage sur la qualité du navet a été réalisée par le dosage des polyphénols totaux et la détermination des activités antioxydantes.

# Revue bibliographique

# Chapitre I :

## Généralités sur le navet

## I.1. Généralités

Le navet était réputé pour être un des légumes les plus anciens, il était autrefois à la base de l'alimentation et il était considéré comme le « légume des pauvres » (Alamy, 2016), sa durée de vie plus longue que la pomme de terre (Lepage, 1967). Il fait parti des plus vieux légumes cultivés. C'est une culture très populaire pour ses propriétés comestibles et parties utiles (racine enflée, feuilles charnues ...) (Taveira, 2009). Actuellement son utilisation est assez limitée et fait de lui un légume relativement secondaire (Pitrat et Foury, 2003).

Le navet est cultivé pour sa racine charnue et ferme, qui peut être de forme, arrondie ou allongée et de couleur blanche violacée ou jaune, plus rarement blanche (Alamy, 2016). Ses racines sont consommées comme un légume et elles sont également transformées en nourriture instantanée (Lepage, 1967).

Ce légume est une plante bascule connue par le nom de *Brassica rapa*, elle appartient à la famille des brassicacées qui comprennent 3400 espèces répartie sur toute l'étendue du globe. Cette famille de brassicacées fournit de nombreux légumes (le chou et ses variétés, les navets, le colza, le cresson, le raifort et les moutardes) (Dupant et Guignard 2015).

Les aliments Brassica sont très nutritifs et apportent des nutriments et des composés photochimiques bénéfiques pour la santé tels que les vitamines, les caroténoïdes, les fibres, les sucres solubles et les minéraux (Saeed *et al.*, 2012).



**Figure 1** : Navets blanc (Anonyme 1).

## I.2. Taxonomie

Le navet a été arraché selon les auteurs et les époques à quatre espèces : *Brassica rapa* par Linné (1753) adopté le plus souvent par la suite à *B.comprestris* par Linné également et érigé en synonyme par Matzer (1883), *B.asperifolia*, mais aussi *Brassica-napus* notamment par certains botaniques français dont beaucoup ont été influencé par la traduction *napus* = navet, *rapa* = rave, les taxonomistes qui se sont aventurés dans la classification infra spécifique ont été souvent malheureux d'où de nombreuses confusions entre « Navet chou-rave » et « Chou-navet » dont le seul premier appartient à l'espèce *rapa*. Actuellement ce légume est connu par le nom de *brassica rapa* (Pitrat et Foury, 2003).

### ➤ Classification botanique

La classification taxonomique du navet est la suivante (Anonyme 2) :

<b>Règne :</b>	Plantae.
<b>Devisions :</b>	Magnoliophyta.
<b>Classe :</b>	Magnoliopsida.
<b>Ordre :</b>	Capparales.
<b>Famille :</b>	Brassicacées.
<b>Sous-famille :</b>	Brassicoidae.
<b>Genre :</b>	<i>Brassica</i> .
<b>Espèce :</b>	<i>Brassica rapa</i> var <i>rapifera</i> .
<b>Noms communs :</b>	Navet, naveau.

## I.3. Historique

La domestication du navet a des origines très anciennes. Le mot « Laptu » en ancien assyrien remonte à 1800 Avant J.C., le navet était un légume très connu dans tout le Moyen-Orient (arabe: ascenseur, per Sian: Salgham), et dans la Grèce antique et à Rome, le navet était une importante plante cultivée et domestiquée (Vogl-Lukasser et al., 2007) par les indigènes en Sibérie (en Asie occidentale) et d'autres parties de l'Asie mineure et d'Europe orientale y compris dans la zone située entre la mer Baltique et le Caucase, les Romains mangeaient des navets, tout comme les classes populaires en Europe au Moyen Âge. Enfin, les Américains venus d'Europe, principalement de la France, les ont amenés dans ce pays au dix-septième siècle. Cependant, il n'était pas beaucoup utilisable au cours de ce siècle et il s'est répandu seulement au 18ème siècle (Polidoro, 2008).

Au Moyen Âge, le navet était une plante alimentaire de base. Le Capitulaire de Villis, Charlemagne (environ 800 après JC) a donné des instructions sur les cultures à planter qui devait être donné à sa cour. Dans les livres à base de plantes du XVIe siècle, on a pu comprendre à quel point les formes du navet varient. Linné a donné la description du navet type *B. rapa* dans son espèce *plantarum* en 1753 (Vogl-lukasser *et al.*, 2007).

De nombreux spécialistes ont travaillé sur la botanique de cette culture, Miller en Angleterre, DeCandolle en Suisse, Metzger en Allemagne et Vilmorin en France ont décrit toutes les variétés du jardin qui étaient si importantes pour l'approvisionnement alimentaire des grandes villes, montrant que l'Europe a été un centre de diversité important pour *Brassica rapa* (Vogl-lukasser *et al.*, 2007).

Aujourd'hui, beaucoup de famille dans le nord des États-Unis n'utilisent pas les navets pour la culture dans leurs jardin potagers car ce légume est en soi un aliment qui ne contient pas beaucoup de fibre, mais en Europe et Canada, il semble être plus populaire (Polidoro, 2008).

#### I.4. Descriptions de la plante

Le navet *brassica rapa* se présente sous forme d'une rosette d'environ quinze feuilles obovales souvent lyrées, vers franc, hérissées de poils raide au touché et sa racine principale de forme et de couleur diverse peut atteindre 35cm de longueur (Pitrat et Foury, 2003). Les fleurs sont regroupées en haut de la grappe et sont généralement élevées au dessus de dernier bourgeon (Fernandes, 2007).



**Figure 2 :** Représentation de la plante *brassica rapa* (Anonyme 3).

### I.5. Composition de navet blanc

Le navet est très riche en eau et en vitamines, minéraux et fibre et pauvre en calorie diurétique, tonifiant et reminéralisant (Alamy, 2016).

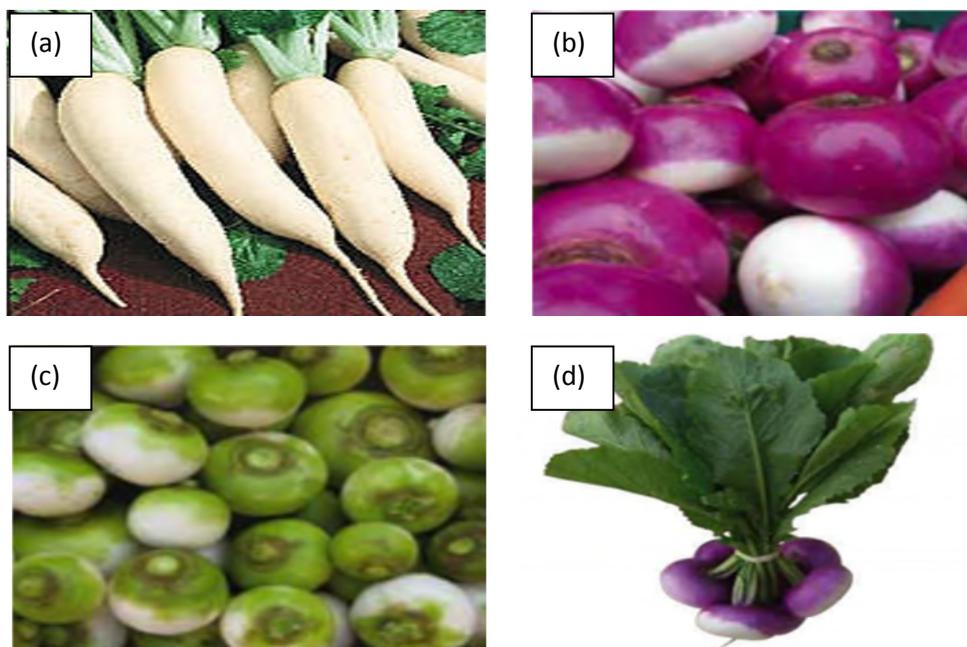
- **Apport en fibre** : Ce légume apporte un peu de fibres environ 1 à 2 pour 80g du navet cru mais pas en quantité significative.
- **Apport en minéraux** : Le navet crus apporte plus de minéraux que le navet cuit, ils ne sont pas présents en quantité très élevé
- **Source de vitamines C** : Une portion de 80g du navet cru contient plus de 20% des AJR en vitamines C antioxydant.

**Tableau I** : La composition chimique du navet (Couplan, 2011)

Composants	Teneurs
Eau	92 g/100 g
Calories	27 kcal/100 g
Protides	1g /100 g
Lipides	0.3 g/100 g
Glucides	6 g/100 g
Calcium (Ca)	32 mg/100 g
Phosphore (P)	27 mg/100 g
Fer (Fe)	0.3 mg/100 g
Sodium (Na)	45 mg/100 g
Potassium (K)	191 mg/100 g
Magnésium (Mg)	11 mg/100 g
Vitamine B1	0.04 mg/100 g
Vitamine B2	0.03 mg/100 g
Vitamine PP	0.4 mg/100 g
Vitamine C	21 mg/100 g

I.6. Les variétés de navets

Il existe plusieurs variétés du navet qui diffèrent par la taille et la forme, la couleur et par leur saison de récolte, parmi ces variétés y a 4 qui dominent le marcher et qui sont faciles à trouver et à cultiver, parmi eux on site le navet violet, blanc, rose et vert.



Variétés	NTr	Type de culture	Comportement		Période de production				Observations	
			Froid	MAG	Print.	Été	Automne	Automne tardif / Hiver (1)		
<b>LONG BLANC RADIS JAPONAIS</b> (a)										
APRIL CROSS F1				●●●	----- ----- -----				Racine blanche d'excellente qualité. Cycle de 60 jours environ.	
<b>ROND BLANC</b>										
TOKYO CROSS F1						----- -----			Cycle rapide (40 jours). Pivot fin. Éviter les semis trop précoces.	
<b>PLAT TYPE MILAN À COLLET ROSE</b> (b)										
DECLIC F1			●	●●●	-----				Coloration et homogénéité exceptionnelles. Hybride F1 de type Milan.	
De Milan à forcer collet rose race ATLANTIC			●	●●●	-----				Très belle coloration, bien délimitée.	
<b>ROND À COLLET VIOLET</b> (d)										
CLOVIS F1	NTr		●	●●	----- -----				Toutes les qualités d'un hybride précoce.	
De Nancy à feuille entière race ARAMIS	NTr		●●	●	----- -----				La référence des "Nancy" d'été / automne.	
PLESSIS F1	NTr		●●●	●	-----				Très homogène et très belle présentation en particulier pour les récoltes de pleine saison.	
RICHELIEU F1 (CLX 3639)*	NTr		●●●●	●	----- -----				Très bel hybride pour bien finir la saison.	
Blanc globe à collet violet race ARMAND	NTr		●●●●	●	----- -----				Grande rusticité et belle présentation.	
<b>ROND À COLLET VERT</b> (c)										
ALDERTON F1 (CLX 3641)	NTr		●●	●●	-----				Qualité hybride. Pour la pleine saison.	

Figure 3 : Les différentes variétés du navet (Le carnet du Maraîcher, 2016).

**I.7. Les intérêts de navet**

Les navets, on les consomme principalement cuit, en soupe, purée, ragout, gratin ou sauté, plus rarement cru râper en salade, seul ou mélangé à d'autres crudités (**Alamy, 2016**). Ce légume est consommé en quantités énormes dans le monde entier, en raison de ses propriétés nutritionnelles.). C'est un légume potentiel car sa consommation prévient ou guérit un grand nombre de problèmes de santé car les racines et les feuilles du navet sont d'excellentes source de vitamines A, C, E et B6, folate (Vit B9), cuivre (Cu), calcium (Ca) et fibres alimentaires (**Moate et al., 2002**).

Le navet est riche en vitamine C et d'antioxydants qui possèdent la capacité de protéger le corps contre les dommages causés par le stress oxydatif induit par les radicaux libres (**Saeed et al., 2012**). En outre, plusieurs études épidémiologiques ont montré que ces légumes avaient des propriétés antioxydants et anti cancérogènes (**Cohen et al., 2000 ; Moore et al., 2007**). La consommation de ce légume est en augmentation en raison de leur valeur nutritive, et sa culture a été associée à la réduction des risques des maladies chroniques, y compris les maladies cardiovasculaires et le cancer (**Cartea et al., 2010**). Il est bénéfique pour réduire les risques d'obésité, d'hypertension, de diabète et de cancers de l'estomac, du pancréas, de la vessie et du poumon (**Saeed et al., 2012**).

# Chapitre II :

## Généralités sur le séchage

### II.1. Le Séchage

Le séchage est une opération importante dans les domaines agricole et industriel. Il consiste à éliminer totalement ou partiellement l'eau d'un produit humide autre que son eau d'hydratation. En terme physique, le séchage résulte le plus souvent d'un transfert simultané de chaleur et de masse au sein du produit à sécher et à l'interface entre ce matériau et l'environnement asséchant (**Kouhila., 2001**)

Le séchage des produits agricoles est une pratique largement répandue, cette méthode offre une stabilisation physico-chimique en enlevant une partie de la teneur en humidité, en produisant différents produits avec de nouvelles propriétés qualitatives ainsi que différentes valeurs nutritionnelles et économiques (**Stamatios et al., 2004**).

Diverses techniques de séchage sont utilisées pour sécher différents produits alimentaires. Chaque technique a ses propres avantages et limites (**Gauhar et al., 1999**).

### II.2.Principe du séchage

Le principe du séchage est de diminuer l'activité de l'eau ( $a_w$ ) de divers matières périssables à des valeurs  $<0,5$ , afin de permettre leur stockage à température ambiante. Et contrôler la durée de conservation des aliments en supprimant la croissance de micro-organismes et on réduisant l'inhibition de la détérioration enzymatique (**Bonazzi et Dumoulin, 2011**).

### II.3.L'objectif du séchage

L'objectif de base du séchage des produits alimentaires est l'élimination de l'eau dans les solides jusqu'à un certain niveau, auquel les microbes et les réactions chimiques d'altération et de détérioration sont grandement minimisées (**Krokida et al., 2001**). Selon (**Bonazzi et Dumoulin, 2011**), il existe plusieurs objectifs :

- prolonger la durée de conservation des aliments sans qu'il soit nécessaire de conserver des produits réfrigérés ;
- réduire la masse et le volume des produits après séchage, ce qui facilite leurs transport et leurs stockage ;
- convertir les produits périssables (surplus) en formes stables (par exemple, le lait en poudre) ;

- produire des ingrédients et des additifs pour la transformation industrielle (produits alimentaires intermédiaires, tels que les légumes pour les soupes, les oignons pour les viandes cuites, fruits pour gâteaux, liants, arômes, colorants alimentaires, gélifiants et protéines émulsifiantes, etc.) ;
- obtenir des plats cuisinés spéciaux (flocons de pommes de terre, boissons instantanées, Céréales, fruits secs utilisés comme collations, etc.), avec des caractéristiques de reconstitution rapide et de bonnes qualités sensorielles, pour une utilisation particulière, telle que dans les distributeurs automatiques, ou directement pour les consommateurs.

#### II.4. Technologie de séchage:

Un certain nombre de techniques de séchage ont été développées au fil des années. À l'exception de la lyophilisation, l'application de chaleur pendant le séchage par (conduction, convection et rayonnement,...) est la technique de base utilisée pour forcer l'eau à se vaporiser, tandis que de l'air forcé est appliqué pour favoriser l'évacuation de la vapeur. La méthode de séchage est choisie en fonction des caractéristiques particulières des produits et des considérations socio-économiques (Orsat *et al.*, 2006).

##### II.4.1. Séchage par ébullition

Le séchage d'un produit par ébullition a eu lieu lorsque la température du produit est élevée à une valeur telle que la pression de vapeur d'eau de ce produit, est égale à la pression totale ambiante ( $P=P_t$ ). Selon (Bonnazi *et al.*, 2003), la température d'ébullition dépend :

- De la pression totale (elle est plus basse sous vide que la pression atmosphérique),
- De l'activité de l'eau du produit.

##### II.4.2. Séchage par entraînement

Le séchage par entraînement consiste à placer un corps humide dans une enceinte où règne un flux gazeux chaud et sec ce qui provoque une différence de température et de pression partielle d'eau, cette différence sera constatée entre le corps et le gaz aboutissant ainsi au phénomène suivant :

- Transfert de chaleur du gaz vers le corps humide sous l'effet d'existence d'un gradient de température,

- Le Transfert de matière (eau) s'effectue du corps vers le gaz sous l'effet de la pression.

Dans la plupart des cas, le gaz utilisé est l'air dans les propriétés thermophysiques, ces dernières lui permettent d'être à la fois un fluide caloporteur, et un vecteur d'élimination de l'eau. L'enceinte où il est placée le corps humide à sécher et le gaz est appelée séchoir (Touati, 2008).

#### II.4.3.Séchage au soleil

Le séchage à l'aide du soleil à ciel ouvert pour conserver les aliments et les cultures agricoles est pratiqué depuis l'antiquité (Sharma *et al.*, 2009). Dans ce processus, les aliments sont directement exposés au soleil, ou même sur le sol ou suspendus dans l'air, les principaux désavantages de ce type de séchage sont les contaminations de l'environnement, la perte de produit et la contamination par les insectes et les oiseaux, micro-organismes, les espèces du sol, difficulté à contrôler la qualité, et mauvaise odeur du produit séché (Shafiur Rahman, 2007). Les pertes sont ainsi importantes, de plus, les produits s'abîment, sèchent trop ou pas assez, ce qui dégrade fortement leur qualité (Dudez *et al.*, 1996).

En général, les produits séchés au soleil ne répondent pas aux normes de qualité internationales et donc ne peuvent pas être vendus sur les marchés internationaux (Esper et Miihlbauer, 1998).

#### II.4.4.Séchage solaire

Le séchage solaire est une extension du séchage au soleil qui utilise l'énergie du rayonnement solaire. Ce type de séchage est un processus non polluant et l'énergie utilisée est renouvelable. De plus, l'énergie solaire est une source d'énergie abandonnée qui ne peut pas être monopolisée. Cependant, ce type de séchage présente plusieurs inconvénients parmi eux : la production à grande échelle, d'où la nécessité de disposer de beaucoup d'arrière-plan et d'importants intrants de main-d'œuvre, et de contrôle du taux de séchage, de l'infestation d'insectes et de la contamination microbienne (Shafiur Rahman, 2007).

Le séchage solaire est souvent différencié du séchage au soleil par l'utilisation d'équipements pour capter le rayonnement solaire afin de maîtriser l'énergie radiative pour les applications de séchage (Sharma *et al.*, 2009).

Les séchoirs solaires peuvent être classifiés en séchoirs solaires directs, indirects et hybrides. Le principe de fonctionnement des séchoirs dépend de la méthode de collecte de

l'énergie solaire et de sa conversion en énergie thermique utile pour le séchage (Nguyen, 2016).

#### II.4.5. Séchage par étuve

Dans cette méthode, l'air chauffé est mis en contact avec le matériel humide pour faciliter la chaleur et le transfert massif; la convection est principalement impliquée. Il faut préciser la consigne :

- de température de l'étuve,
- le temps de séjour,
- et la taille de l'échantillon à tester.

Le choix de ces deux critères (taille et temps de séjours) doit être adapté au rapport surface/volume. Et les Produits déshydratés peuvent avoir une durée de vie plus longue mais, malheureusement, la qualité du produit séché par l'air chauffé est généralement réduite par rapport à celle du produit alimentaire d'origine (Vasseur, 2009).



**Figure 4 :** Etuve universelle ventilée (Anonyme 4).

Ce type de séchage présente plusieurs avantages (Nguyen, 2016) :

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

Néanmoins, Nguyen, 2016 a souligné que ce séchage a beaucoup d'Inconvénients parmi eux:

- L'opération pourrait facilement aboutir à un retrait considérable du produit (principalement au début de l'opération),
- une perte notable de la qualité nutritionnelle,
- un temps de séchage généralement important.

#### II.4.6. Séchage par micro-onde :

Cette méthode consiste à sécher un échantillon en le chauffant dans un four à micro-ondes pour une durée calibrée, peut produire des résultats en quelques minutes au lieu des heures comme c'est le cas dans la plupart des techniques conventionnelles. Plusieurs facteurs doivent être déterminés lors du choix de cette méthode, parmi lesquels: la masse de l'échantillon, le niveau de puissance du micro-onde, la durée du chauffage (**Bouraoui et al., 1993**).

Le séchage par micro-ondes utilise de l'énergie électrique dans la gamme de fréquences de 300 MHz à 300 GHz, la fréquence la plus utilisée étant de 2 450 MHz. Les micro-ondes sont générées à l'intérieur d'un four en augmentant le courant alternatif de lignes électriques domestiques à une fréquence de 60 Hz jusqu'à 2 450 MHz (**Orsat et al., 2006**).

L'absorption d'énergie par micro-ondes dans les aliments implique principalement deux mécanismes: relaxation dipolaire et conduction ionique. En raison de leur nature dipolaire les molécules d'eau tentent de suivre le champ électrique lorsqu'elles alternent à de très hautes fréquences, De telles rotations de l'eau les molécules produisent de la chaleur, des ions, tels que ceux présents dans des aliments salés et qui migrent sous l'influence du champ électrique, générer de la chaleur, c'est le deuxième mécanisme majeur de chauffage aux micro-ondes (**Zhang et al., 2010**).

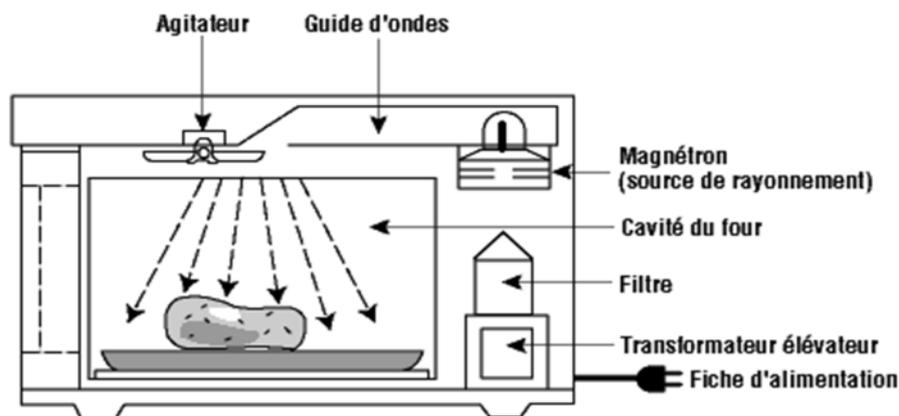


Figure 5 : Schéma d'un four à micro-onde (Anonyme 5).

#### ➤ Avantages et limites du séchage par micro-onde

Le séchage assisté par micro-onde présente beaucoup d'avantages (**Ozkan et al., 2005**) :

- Réduction du temps de séchage,
- répartition homogène de l'énergie sur le matériau,
- l'inhibition de la température de surface élevée,
- poursuite de la respiration du produit,
- réduction de la perte de matériaux soluble dans l'eau et de composants (minimisé le déclin de la qualité du produit),
- économie d'énergie.

Par contre, l'utilisation de ce type de séchage selon **Orsat et al. (2006)** à plusieurs inconvénients:

- Coûts initiaux élevés pour l'échelle industrielle,
- La texture du produit peut être affectée,
- La taille et la forme spécifiques de l'échantillon peuvent être nécessaires pour un séchage efficace.

#### **II.4.7. Lyophilisation**

La lyophilisation concerne un produit qui est préalablement congelé, de telle sorte que l'eau puisse passer directement de l'état solide (glace) vers la phase vapeur sans l'étape de fusion, ce changement d'état appelé : sublimation. La période de sublimation est suivie d'une période de séchage par désorption d'eau liée à une température de plus en plus élevée en atmosphère de vapeur d'eau pure et sous vide (**Vasseur, 2011**).

À la fin de la lyophilisation, le produit ne contient plus que 1% à 5% d'eau, ce qui est extrêmement faible. Si l'activité de l'eau est inférieure à 0,4 et supérieure à 0,2, elle assure souvent une bonne préservation de la matière (**Nguyen, 2016**).

#### **II.5. Cinétique de séchage :**

Etant donnée les très grandes variabilités et diversité des produits alimentaires et biologiques, le meilleur moyen de caractériser le comportement au séchage d'un produit consiste à mesurer expérimentalement sa cinétique de séchage. Dans le cas d'un produit solide séché par entraînement, l'expérience consiste à placer le produit en question dans un courant d'air parfaitement métrisé (température, humidité, vitesse) et à enregistrer l'évolution

de sa masse au cours du temps, par des pesées à intervalle de temps régulier. D'autres techniques sont envisageables (Bonnazi et Bimbenet, 2003).

### II.5.1. Période de séchage

Deux types de courbes permettent de décrire l'évolution du produit au cours de séchage :

- Le taux d'humidité du produit en fonction du temps (figure 7).
- La vitesse de séchage du produit ( $dn_s/dt$ ) en fonction du temps (figure 8).

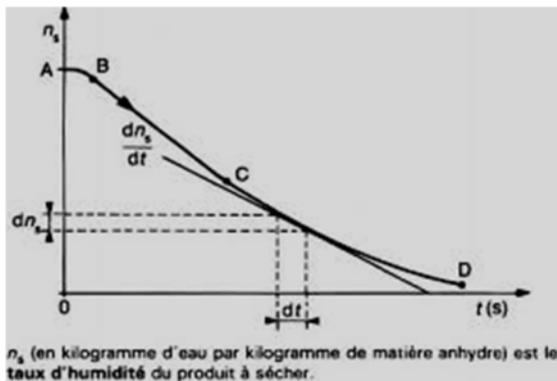


Figure 7 : évolution de taux d'humidité en fonction du temps (Touati, 2008).

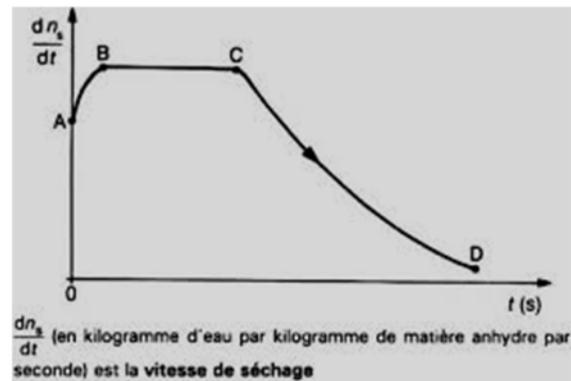


Figure 8: évolution de vitesse en séchage en fonction du temps (Touati, 2008).

Ces courbes permettent classiquement de distinguer 3 périodes de séchage (Bonnazi et Bimbenet, 2003).

#### II.5.1.1. Période 0 de mise en température du produit (AB)

La période de mise en température est courte et n'apparaît véritablement que si les produits sont de grandes tailles, ou si la différence de température entre l'air et le produit est importante : ce qui explique le peu d'intérêt manifesté par les chercheurs dans l'étude de cette phase (Touati, 2008).

#### II.5.1.2. Période 1 de séchage à vitesse constante (BC)

Correspond à l'évaporation de l'eau libre. L'activité de l'eau à la surface du produit est alors égale à 1, dans cette période le séchage correspond à une évaporation isenthalpique de l'eau (Touati, 2008).

#### II.5.1.3. Période 2 de séchage à vitesse décroissante ou ralentissement (CD)

La surface du produit passe sous la limite inférieure du domaine hygroscopique, l'activité de l'eau en surface du produit est inférieure à 1 et les transferts internes de matière

deviennent limitant, la teneur en eau basse sèche diminue jusqu'à atteindre une valeur limite (**bimbenet et al.,1984**).

Pour les produits alimentaires et biologiques on n'observe pas en générale la période de séchage à une vitesse constante et cette dernière est souvent divisée en deux, trois sous période, qui correspondent à des changements structuraux dans le matériau (**Bonnazi et Bimbenet, 2003**).

## II.6. Mécanisme intervenant au cours du séchage

La dynamique du processus de séchage des aliments implique un transfert simultané de chaleur et de masse (**Hernandez-Perez et al., 2004**).

### II.6.1. Transfert de chaleur

Le transfert de chaleur s'effectue toujours de zone de température élevée au zone de température base il existe 3 mécanisme de transfert de chaleur (**Nout et al., 2003**).

#### II.6.1.1. Conduction

La conduction est la diffusion de la chaleur d'une molécule à molécule, sans qu'il y ait un mouvement apparent de la matière sous l'effet d'un gradient de température (**Bonazzi et Dumoulin, 2011**). Dans ce mécanisme le séchage du produit se base sur un contacte directe du produit avec une surface chauffante sur laquelle il est posé (**Bonnazi et Bimbenet, 2003**).

Ce mode de transmission caractérise essentiellement les transferts de chaleur dans les solides où entre corps solides contigus (**Charreau et Cavailé, 1991**).

#### II.6.1.2. Convection:

La convection est le mode de transfert d'énergie entre une surface solide et l'adjacent liquide ou gaz qui est en mouvement (**Cengel, 2002**). Il s'agit du mode de transfert d'énergie le plus courant au niveau du séchage industrielle. Cette méthode de séchage consiste à mettre en contacte un gaz s'écoulant en régime généralement troublent autour du corps à sécher (**bimbenet et al.,1984**).

Elle implique les effets combinés de la conduction et le mouvement du fluide. Plus le mouvement du fluide est rapide, plus le transfert de chaleur par convection est important. La convection est appelée forcée si le liquide est forcé de s'écouler sur la surface par des moyens extérieurs tels qu'un ventilateur, une pompe ou le vent (**Cengel, 2002**).

### II.6.1.3. Rayonnement

Le rayonnement est l'énergie émise par la matière sous la forme d'ondes électromagnétiques (photons) à la suite des changements dans les configurations électroniques des atomes ou des molécules. Contrairement à la conduction et la convection, le transfert d'énergie par rayonnement ne nécessite pas la présence d'un support intermédiaire. En fait, le transfert d'énergie par rayonnement est plus rapide (à la vitesse de la lumière) et il ne subit aucune atténuation dans le vide. Dans les études de transfert de chaleur nous sommes intéressés par le rayonnement thermique, qui est sous forme de rayonnement émis par les corps en raison de leur température (**Cengel, 2002**).

### II.6.2. Transfert de matière

L'eau migre de l'intérieur vers la surface du produit sous l'action de divers mécanismes qui peuvent se combiner. Il est généralement admis que le transport capillaire est l'un des mécanismes fondamentaux dans les produits poreux riches en eau.

Dans les produits alimentaires on préfère souvent attribuer le transport d'eau à une diffusion d'eau liquide sous l'effet de gradient de concentration. L'évaluation de teneur en eau s'exprime en fonction de teneur en eau et d'une diffusivité globale qui regroupe les différents phénomènes de transport, dans une loi analogue la seconde loi de fick (**Bonnazi et Bimbenet, 2003**).

$$dx/dt = D_{pp}.V^2X$$

**D<sub>pp</sub>** : diffusivité apparente (exprimé en m/s) qui le plus souvent varie avec la température et la teneur en eau du produit est affecté par la rétraction de la matière solide.

### II.7. Phénomènes produit au cours de séchage :

Le séchage présente deux inconvénients majeurs : une consommation d'énergie considérable et des modifications d'ordre biochimique, physique ou mécanique qui dégradent fortement les qualités nutritionnelles et organoleptiques des produits traités (**Jonas et al., 2012**).

En règle générale, les températures de séchage élevées ont tendance à altérer la qualité des produits alimentaires, mais il serait plus précis de dire que ces changements de qualité sont lié aux temps du séchage et à la température, ces deux paramètres (Temps du séchage et

température) améliorent les vitesses de réaction, qui sont également fortement dépendante de l'activité de l'eau ( $a_w$ ) des produits (**Bonazzi et Dumouli, 2011**).

### II.7.1. Réaction biochimique

Selon **Bonazzi et Dumouli (2011)**, de nombreuses réactions biochimiques peuvent être induites par l'augmentation de la température dans les aliments :

- Réaction de Maillard,
- le brunissement enzymatique,
- le brunissement non enzymatique,
- dégradation des vitamines, oxydation des graisses ce qui cause la modification de la saveur,
- dénaturation thermique des protéines instables.

### II.7.2. Phénomène mécanique

Il y en a divers types selon **Bonazzi et Bimbenet (2003)** :

- Les phénomènes de migration des solutés vers la surface,
- migration de matières grasses,
- le croutage, les fissures,
- les déformations.

### II.7.3. Transfert physique:

Différents phénomènes liés à la perte d'eau et à la variation de la température dans le temps sont observés au cours du séchage parmi lesquelles (**Bonazzi et Bimbenet, 2003**) :

- Diminution de l'activité de l'eau,
- transition vitreuse, cristallisation,
- fonte des graisses,
- évaporation de composants volatils,
- migration ou rétention de composants, volatiles ou non.

# Partie pratique

# Chapitre III :

## Matériel et méthodes

Toutes les expériences réalisées durant ce travail ont été effectués au niveau de Laboratoire de Biochimie, Biophysique, Biomathématique et Scientométrie (LBBBS) et au Laboratoire d'Analyse Instrumentale de l'université de Bejaia.

### III.1. Préparation des échantillons

Le navet blanc, variété longue de couleur blanche, est la matrice végétale utilisée dans cette étude (Figure 9), c'est un légume très recommandés dans l'alimentation humaine car il joue un rôle important contre divers maladies, vue sa richesse en éléments nutritifs, vitamines et oligoéléments. Les échantillons de navet frais, achetés au niveau du marché local de la wilaya de Bejaia, ont subis un triage, un lavage à l'eau du robinet puis à l'eau distillée et un découpage en petit morceaux avec une épaisseur de quelques millimètres.



Figure 9 : Photographie des navets frais.

*Comment peut-on obtenir une poudre de navets à partir de navet frais ?*

*Quelle est la méthode la plus adéquate pour le séchage de navet blanc ?*

### III.2. Cinétique de séchage

Les échantillons de navets ont été séchés en utilisant deux méthodes, une méthode innovante (assisté par micro-onde) et une méthode conventionnelle (assisté par étuve).

#### III.2.1. Séchage assisté par micro-onde

90g de petits morceaux de navet on été déposé en monocouche sur une assiette en verre a montre et irradiés par micro-ondes (Maxipower, Chine) à des puissances de 200, 400, 600 et 800 W avec un pas de 5 secondes. Les essais ont été réalisés en triplicat pour chaque puissance d'irradiation jusqu'à l'obtention d'un poids constant. Les échantillons séchés ont

subis un broyage, la poudre ainsi obtenus a été stockée a l'abri de l'air et de l'humidité pour la suite des analyses.

### III.2.2 Séchage assisté par étuve

Le suivi de la cinétique de séchage à l'étuve a été effectué à deux températures, 60 et 80 °C avec un pas de 10 minutes, en suivant la même procédure que celle du séchage par micro-ondes. Les essais ont été réalisés en triple pour chaque température de séchage jusqu'à l'obtention d'un poids constant. Les échantillons séchés ont subis un broyage, la poudre ainsi obtenus a été stockée a l'abri de l'air et de l'humidité pour la suite des analyses.

### III.3.Teneur en eau avant et après le séchage

La teneur en eau du navet frais (5 g) et de la poudre du navet (0,30 g) a été déterminée en triple dans une étuve à 104 °C jusqu'à la stabilisation du poids, comme décrit par **Boulkbatche-Makhlouf et al. (2013)** et rapporté en pourcentage selon l'équation suivante :

$$\text{Teneur en eau (\%)} = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100$$

$M_i$  : masse de l'échantillon en gramme (g) avant la mise à l'étuve.

$M_f$  : masse de l'échantillon en gramme (g) après la mise à l'étuve.

### III.4. Analyse phytochimique

#### III.4.1.Extraction des composés phénoliques totaux (TPC)

L'extraction des composés phénoliques totaux du navet a été réalisée par macération. Un gramme de poudre du navet a été mélangé avec 100 ml d'éthanol à 80 %. Ensuite, le mélange a été agité pendant 24 heures à une température ambiante puis filtré sur un papier wattman comme décrit par **Brahmi et al. (2012)** avec quelques modifications.

#### III.4.2. Dosage de composés phénolique totaux (TPC)

La teneur en polyphénols des poudres séchées a été quantifiée en utilisant le réactif de Folin-Ciocalteu, selon la méthode décrite par **Georgé et al. (2005)**. Ce test est basé sur la réduction du Folin-Ciocalteu, constitué par un mélange d'acide phosphotungstique ( $H_3PW_{12}O_{40}$ ) et d'acide phosphomolybdique ( $H_3PMO_{12}O_{40}$ ), lors de l'oxydation des phénols en mélange d'oxydes de tungstène ( $W_8O_{23}$ ) et de molybdène ( $MO_8O_{23}$ ). La coloration bleue produite est proportionnelle à la teneur en composés phénoliques totaux présents dans l'échantillon (**Boizot et Charpentier, 2006**).

500 µl d'extrait (pour chaque puissance et température) ont été mélangés avec 2,5 ml du folin-Ciocalteu (dilué à 1/10), après 5 min, 2 ml de carbonate de sodium (75 g/l) ont été rajoutés. Le mélange a subi une incubation au bain marie préalablement réglé à 50 °C et l'absorbance a été mesurée à une longueur d'onde de 760 nm. La concentration en composés phénoliques a été déterminée en utilisant l'acide gallique comme standard et exprimée en mg EAG/g MS (**Annexe 2**).

### III.5. Evaluation de l'activité antioxydante

#### III.5.1. Test du piégeage du radical DPPH

2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl (DPPH) est un radical libre stable qui est largement utilisé pour estimer la capacité antiradicalaire des composés phénoliques. Dans ce test les antioxydants réduisent le 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl ayant une couleur violette en un composé jaune, dont l'intensité de la couleur est inversement proportionnelle à la capacité des antioxydants présents dans le milieu. 100 µl d'extrait ont été ajoutés à 3 ml de solution de DPPH comme décrit par **Achat et al. (2012)**. L'absorbance a été mesurée à une longueur d'onde de 517 nm après 20 minutes d'incubation à l'obscurité. Les résultats obtenus ont été exprimés en pourcentage selon l'équation ci-dessous :

$$\text{DPPH \%} = [(A_0 - A_1) / A_0] \times 100$$

$A_0$  : absorbance de control.

$A_1$  : absorbance de l'échantillon.

#### III.5.2. Pouvoir réducteur

Le pouvoir réducteur des extraits phénoliques du navet a été déterminé selon la méthode décrite par **Oyaizu. (1986)**. 1 ml d'extrait a été mélangé avec 2,5 ml de tampon phosphate de sodium (pH = 6,6) et 2,5 ml de ferricyanure de potassium à 1 %. Le mélange a été incubé à 50 °C pendant 20 min. Après avoir ajouté 2,5 ml d'acide trichloroacétique à 10 %. 5 ml d'extrait ont été mélangés avec 5 ml d'eau distillée et 1 ml de chlorure ferrique à 0,1 % et l'absorbance a été mesurée à 700 nm. Les essais ont été réalisés en triple et les résultats ont été exprimés en milligrammes d'équivalent trolox par millilitre d'extrait (mg ET /ml Ext) (**Annexe 3**).

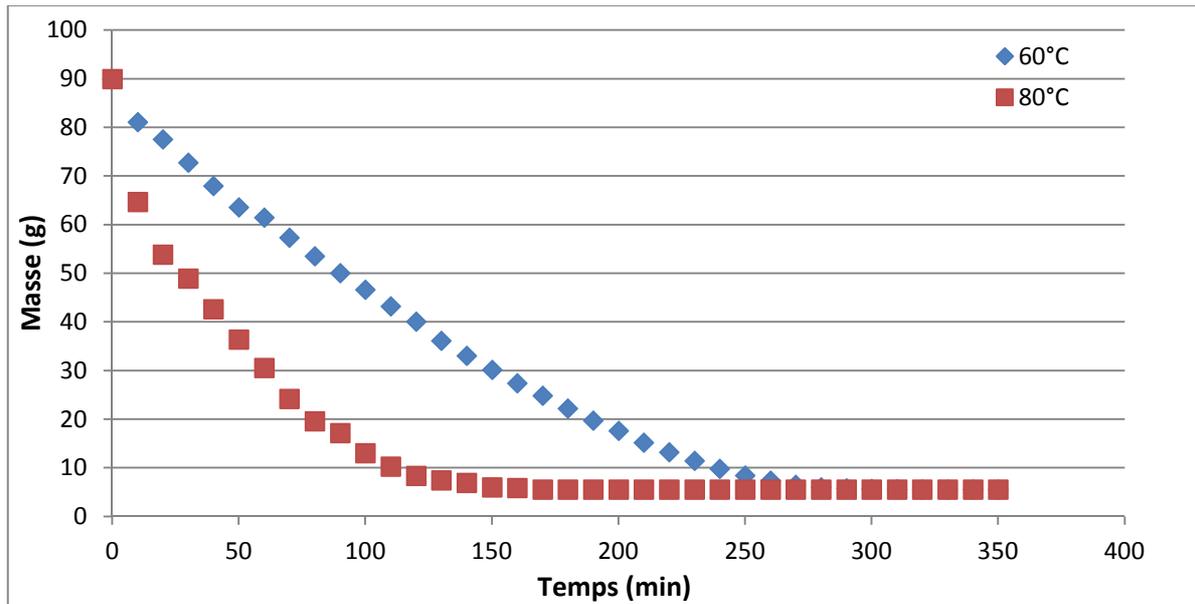
# Chapitre IV : Résultats et discussion

### IV.1. Cinétique de séchage

Les deux techniques adoptées dans cette étude pour le séchage du navet blanc sont : le séchage conventionnel (assisté par étuve) et le séchage innovant (assisté par micro-onde).

#### IV.1.1. Cinétique de séchage assisté par étuve

Les résultats de l'évolution de la perte de masse des échantillons du navet en fonction du temps pour les températures 60 et 80 °C ont été représentés dans la figure 10.

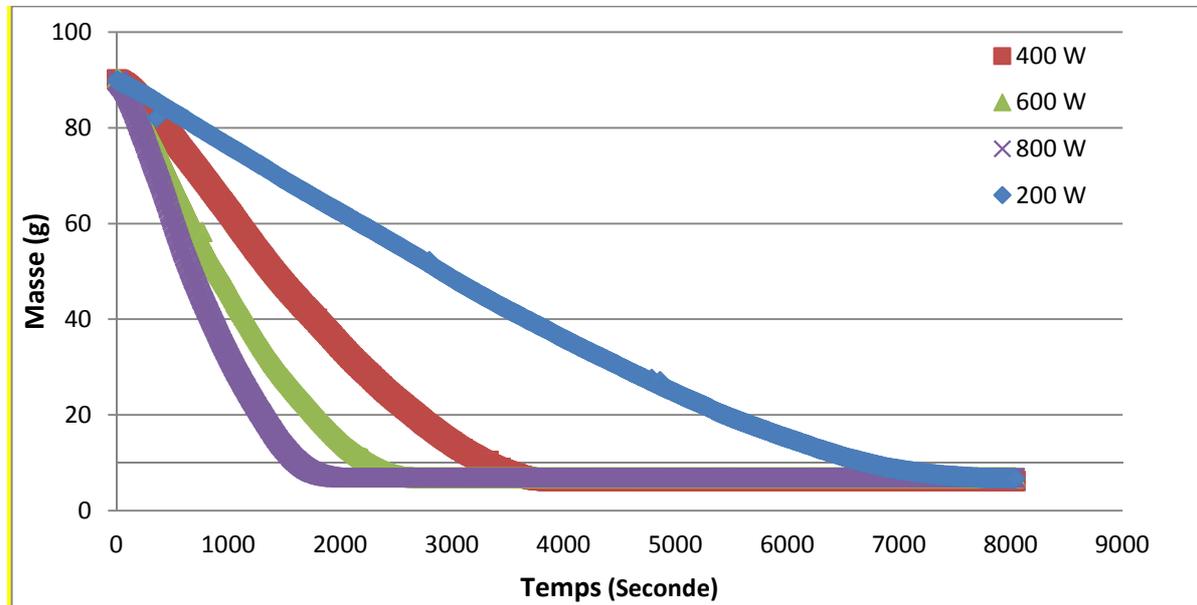


**Figure 10** : Evaluation de la perte de masse en fonction du couple temps-température.

Les résultats obtenus montrent que le poids des échantillons diminue avec la progression du temps de séchage par étuve. L'évolution de la perte de poids est différente d'une température à une autre, elle est plus rapide à 80 °C avec un temps de 160 min qu'à 60 °C avec un temps de 270 min. En effet, le temps total de séchage a été considérablement réduit avec l'augmentation de la température. D'après les résultats obtenus il a été observé que le temps de séchage est inversement proportionnel à la température appliquée. Selon **Correia et al. (2015)** l'augmentation des températures réduit le temps de séchage et favorise l'élimination partielle de l'eau.

### IV.1.2. Cinétique de séchage assisté par micro-onde

Les résultats de l'évolution de la perte de masse des échantillons du navet en fonction du temps de séchage au micro-onde pour les différentes puissances (200, 400, 600 et 800 W) ont été représentés dans la figure 11.



**Figure 11 :** Evaluation de la perte de masse en fonction du couple temps-puissance.

Les résultats obtenus montrent que le poids des échantillons diminue avec la progression du temps de séchage par micro-onde. L'évolution de la perte de poids est différente d'une puissance à une autre. Le temps de séchage le plus court a été enregistré à 800 W avec une durée de 2000 seconde (33,33 minutes), alors que le temps de séchage le plus long a été enregistré à 200 W avec une durée de 7500 seconde (125 minutes). En effet, l'augmentation de la puissance des micro-ondes augmente sensiblement la vitesse de la perte de poids, ce qui diminue automatiquement le temps de séchage. D'après les résultats obtenus, il a été constaté que le temps de séchage est inversement proportionnel à la puissance d'irradiation. Selon Mikula, (1992), l'efficacité de séchage par micro-onde peut être expliquée sous l'effet que la puissance micro-onde chauffe l'eau dans la masse de produit, ce qui provoque des îlots de surpression, ces derniers vont migrer du cœur vers l'extérieur du produit en emmenant une stabilité du poids.

Les figures 10 et 11 montrent que le temps de séchage par micro-onde est de courte durée comparé à celui de l'étuve. L'efficacité du séchage par micro-onde peut être expliquée par le fait qu'il est basé sur un mode de chauffage volumétrique unique facilité par un rayonnement électromagnétique et génération de vapeur interne. Le chauffage de l'intérieur

d'un produit alimentaire conduit à l'accumulation d'une pression de vapeur interne qui provoque l'expulsion de l'humidité du produit. Les réactions du produit au chauffage diélectrique aboutissent à un couplage rapide de l'énergie dans l'humidité conduisant à un chauffage et à un séchage rapide (Feng et Tang, 1998).

#### IV.2. Modélisation de la cinétique de séchage

La masse des échantillons de navet blanc a été pesée dans un intervalle de temps de 10 minutes pour le séchage assisté par étuve et de 5 secondes pour le séchage assisté par micro-onde, jusqu'à l'obtention d'une masse constante indiquant l'atteinte de l'équilibre.

Pour modéliser les courbes, de nombreuses corrélations empiriques existent dans la littérature scientifique. Parmi ces modèles, on a choisi ceux d'exponentielle de polynôme (puissance 2) et exponentielle, afin d'étudier l'influence de la température et des puissances sur la perte de masse (tableau II).

**Tableau II :** Modèle empirique de séchage en couche mince

Nom de modèle	Equation de modèle
Exponentielle de polynôme	$Y = \text{Exp}(a + bx + cx^2)$
Exponentielle (exponentielle)	$Y = y_0 + A * \text{Exp}(R_0x)$

Pour déterminer les constantes du modèle on utilise la régression non linéaire, l'efficacité de ce modèle est indiquée à partir d'un paramètre statistique qui est le coefficient de détermination ( $R^2$ ) et l'analyse des résidus. L'analyse de cette régression a été effectuée au moyen du logiciel « OriginPro 8 SR0 V8.0724(B724) copyright 1991-2007 OriginLab Corporation »

#### ✓ Modélisation du séchage assisté par étuve

Les résultats de la modélisation pour les températures 60 et 80 °C sont présentés sur les figures suivantes (12, 13, 14 et 15) :

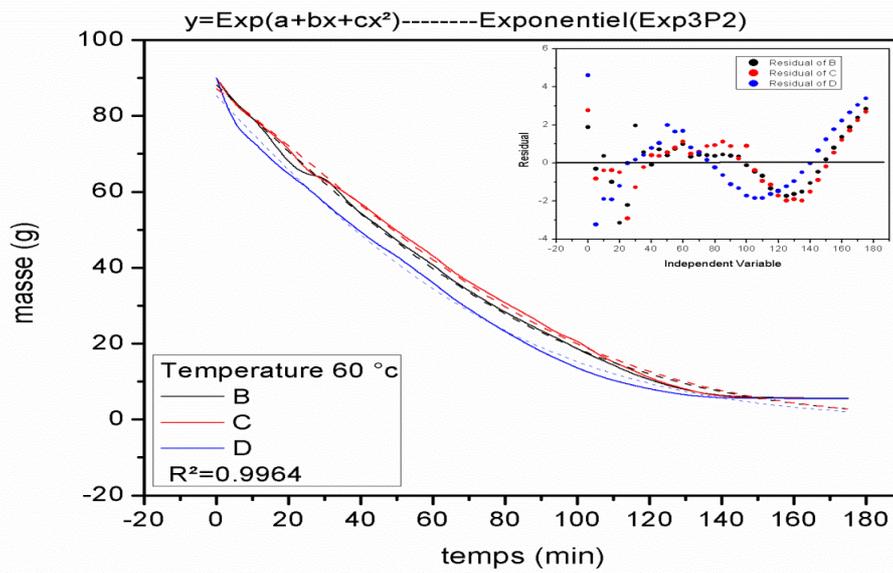


Figure 12 : Modèle exponentielle de polynôme T = 60 °C

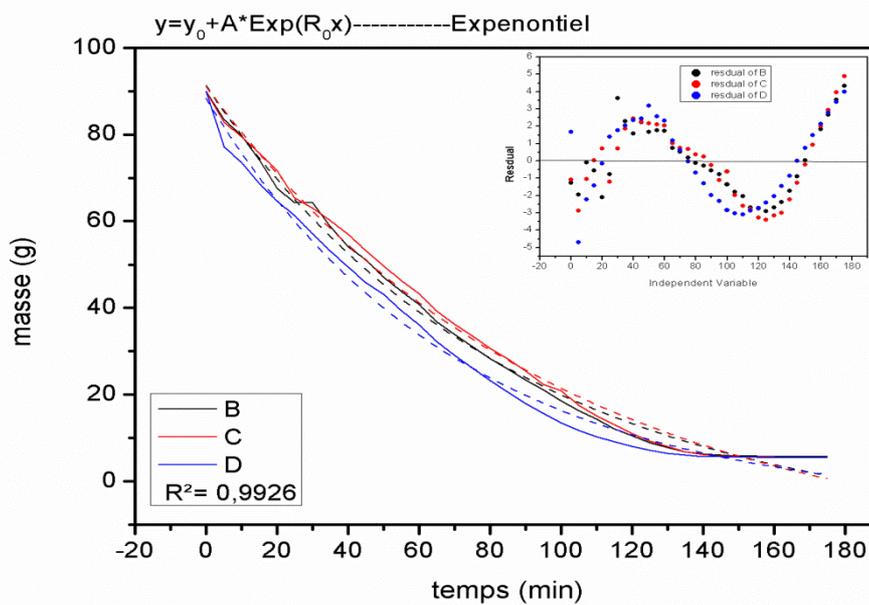


Figure 13 : Modèle exponentielle T = 60 °C

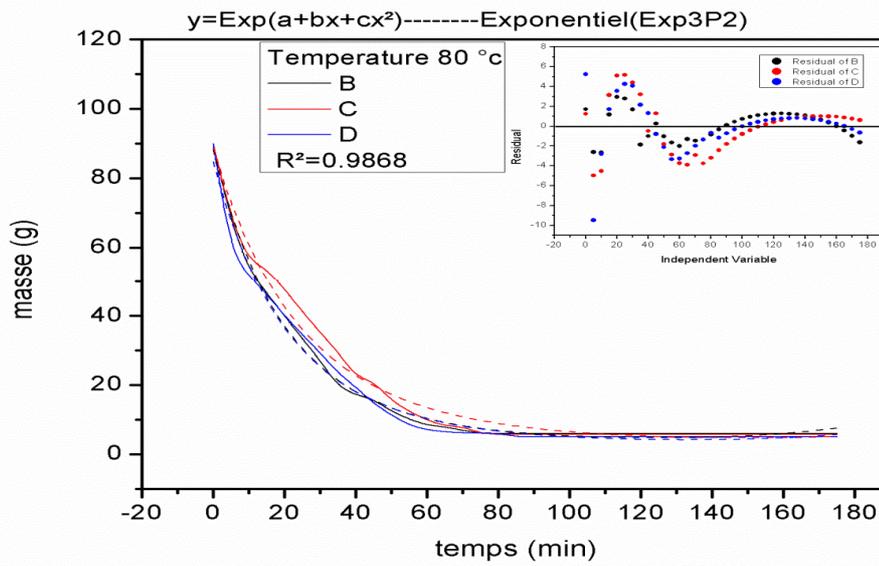


Figure 14 : Modèle exponentielle de polynôme T = 80 °C.

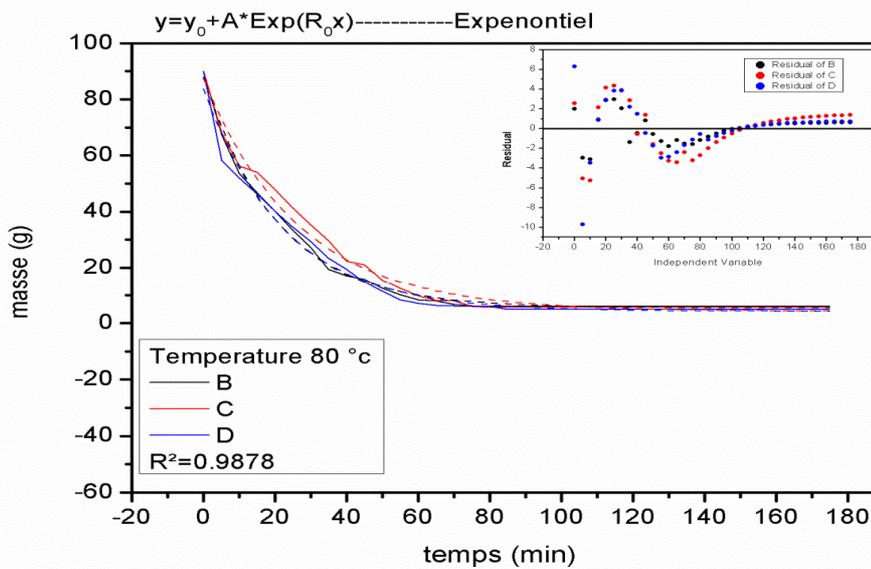


Figure 15 : Modèle exponentielle T = 80 °C.

Les paramètres de modélisation de la cinétique de séchage par étuve, pour les deux modèles utilisés, sont représentés dans le tableau III suivant :

Tableau III : Paramètres de modélisation de la cinétique de séchage par étuve.

	Nom de modèles							
	Exponentielle de polynôme			R <sup>2</sup>	Exponentielle			R <sup>2</sup>
	a	b	c		Y <sub>0</sub>	A	R <sub>0</sub>	
60 °C	4,4648	-0,010	-5,823.10 <sup>-5</sup>	0,9964	-11,843	102,074	-0,012	0,9926
80 °C	4,4865	-0,044	1,638.10 <sup>-4</sup>	0,9868	4,584	81,787	-0,430	0,9878

D'après les résultats obtenus pour les deux paramètres coefficient de détermination (R<sup>2</sup> et résidus) de chaque modèle utilisé à deux températures 60 et 80 °C, montrent que le modèle polynôme correspond mieux à la cinétique de séchage a 60 °C, car le coefficient de détermination (R<sup>2</sup> = 0,9964) est plus proche de 1 et les résidus sont moins variable et plus proche de 0 par rapport aux résultats obtenus dans le modèle exponentielle.

Ces résultats montrent aussi que le modèle exponentielle correspond mieux à la cinétique de séchage à 80 °C, car le coefficient de détermination (R<sup>2</sup> = 0,9878) est plus proche de 1 et les résidus sont moins variables et plus proche de 0 par rapport aux résultats obtenu dans le modèle polynôme.

✓ **Modélisation de séchage assisté par micro-onde**

Les résultats de la modélisation pour les différentes puissances (200, 400, 600 et 800 W) sont représentés dans les courbes suivantes :

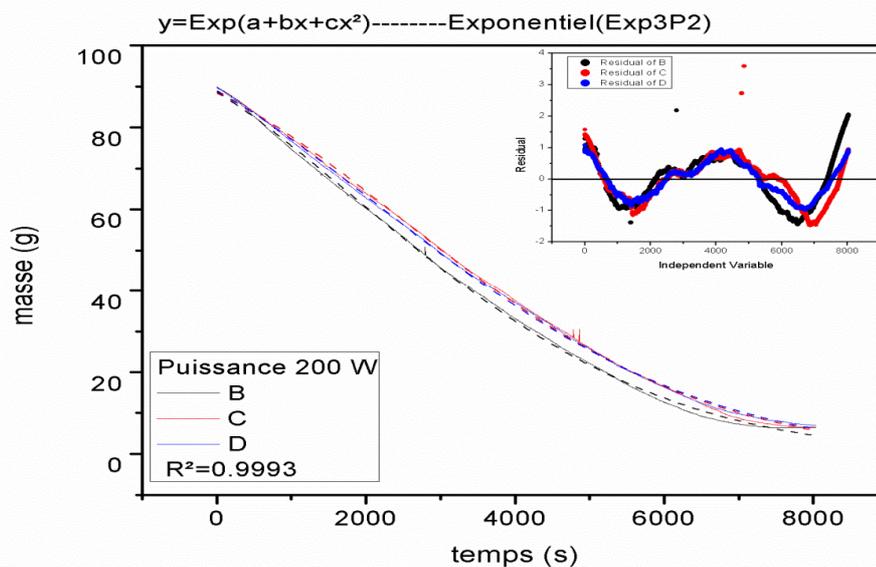


Figure 16 : Modèle Exponentielle de polynôme P = 200 W

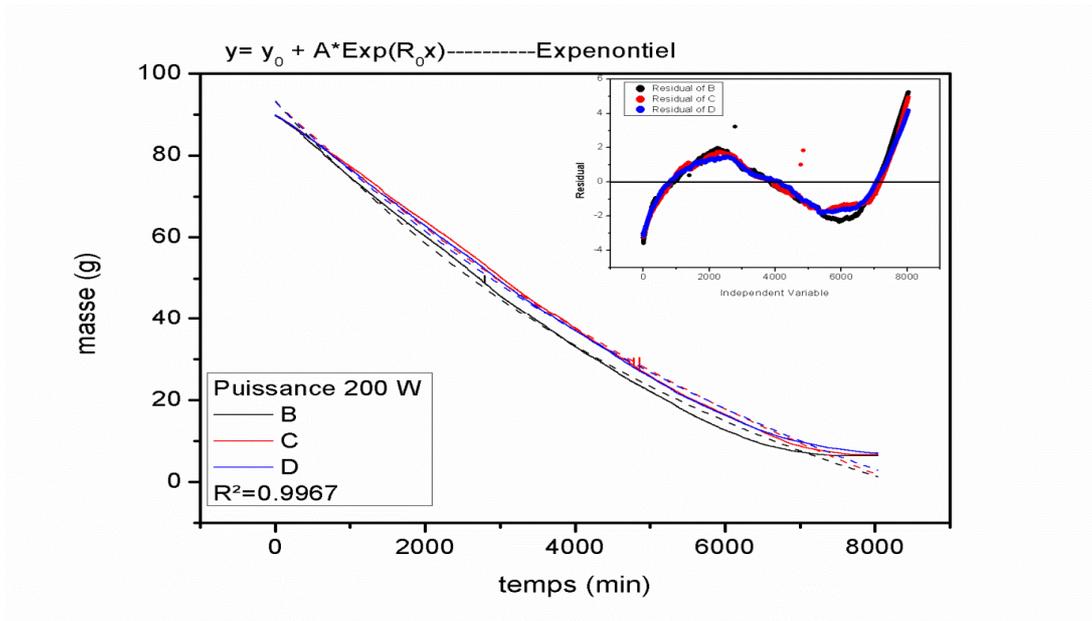


Figure 17 : modèle Exponentielle P = 200 W.

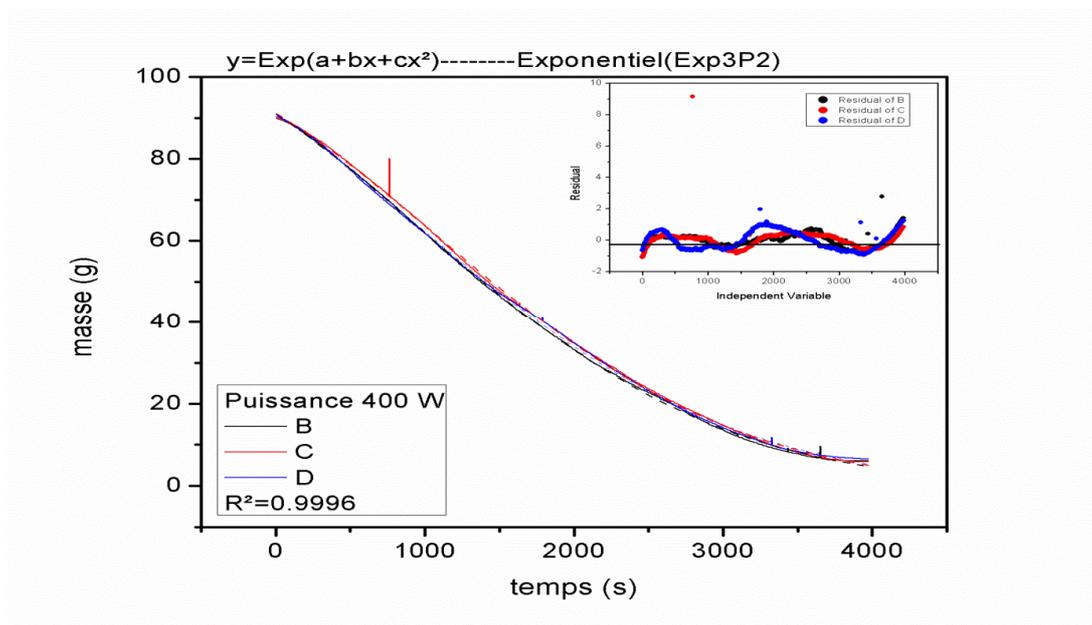


Figure 18 : Modèle exponentielle de polynôme P= 400 W.

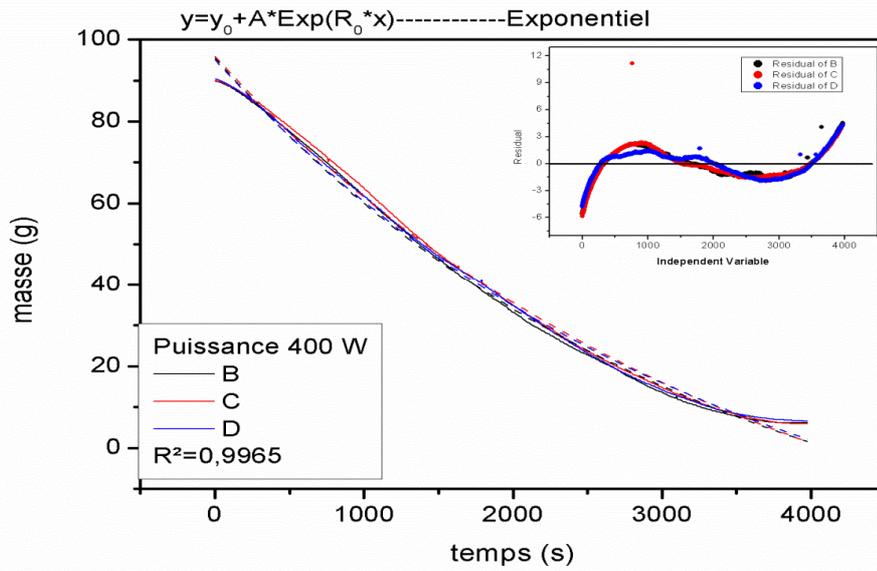


Figure 19 : Modèle exponentielle P = 400 W.

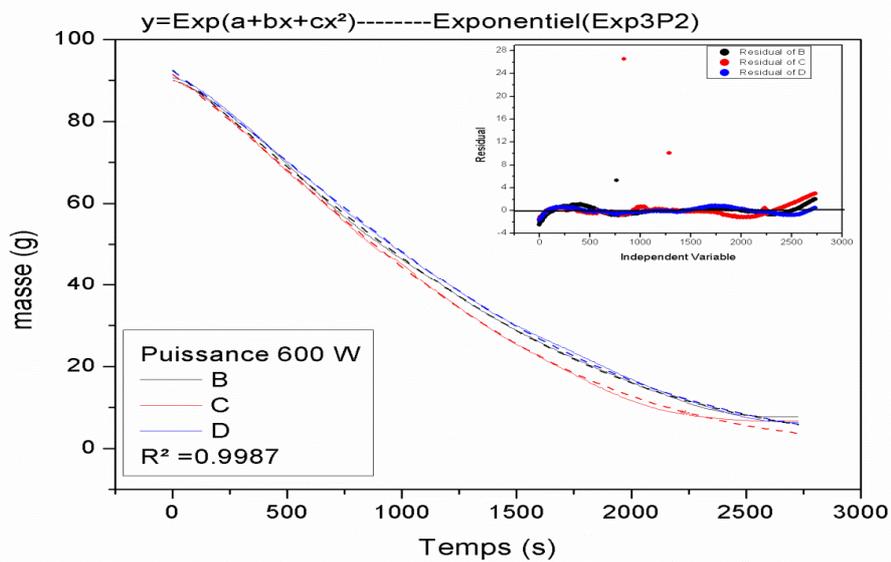


Figure 20 : Modèle exponentielle polynôme P= 600 W.

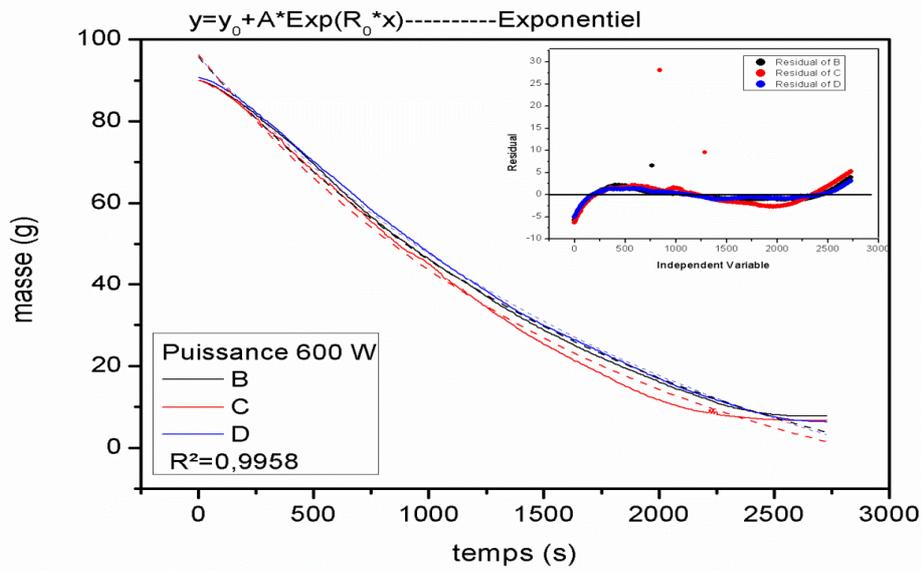


Figure 21 : Modèle exponentielle P = 600 W.

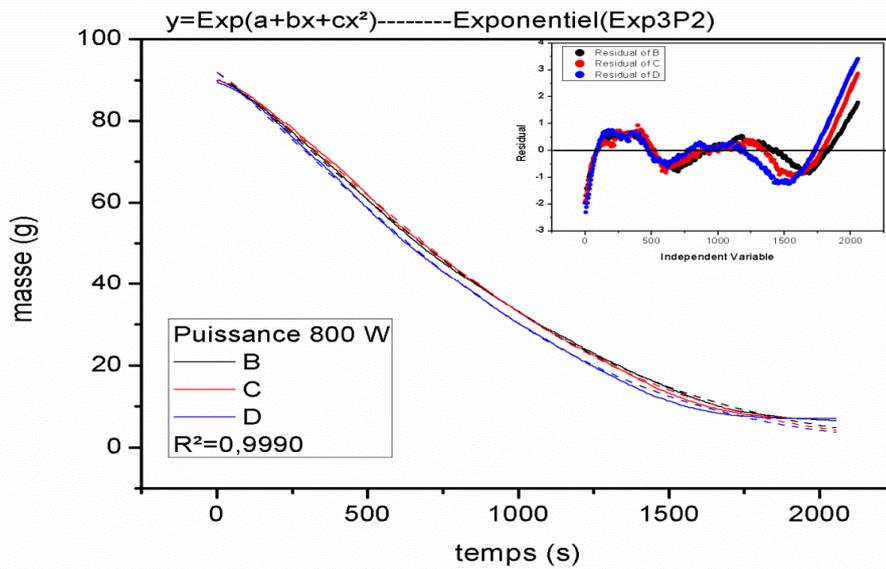


Figure 22 : Modèle exponentielle de polynôme P = 800 W.

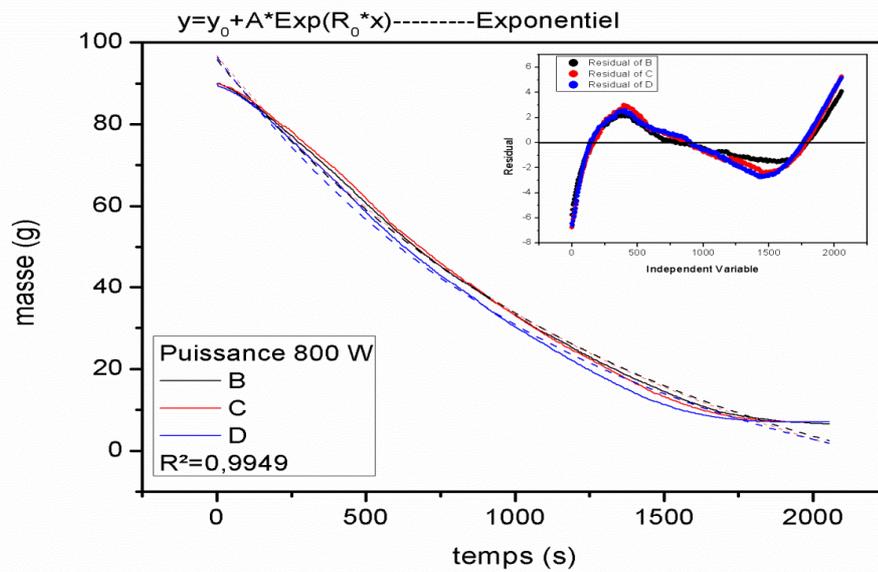


Figure 23 : Modèle Exponentielle P = 800 W.

Les paramètres de modélisation de la cinétique de séchage par micro-onde, pour les deux modèles utilisés, sont représentés dans le tableau suivant :

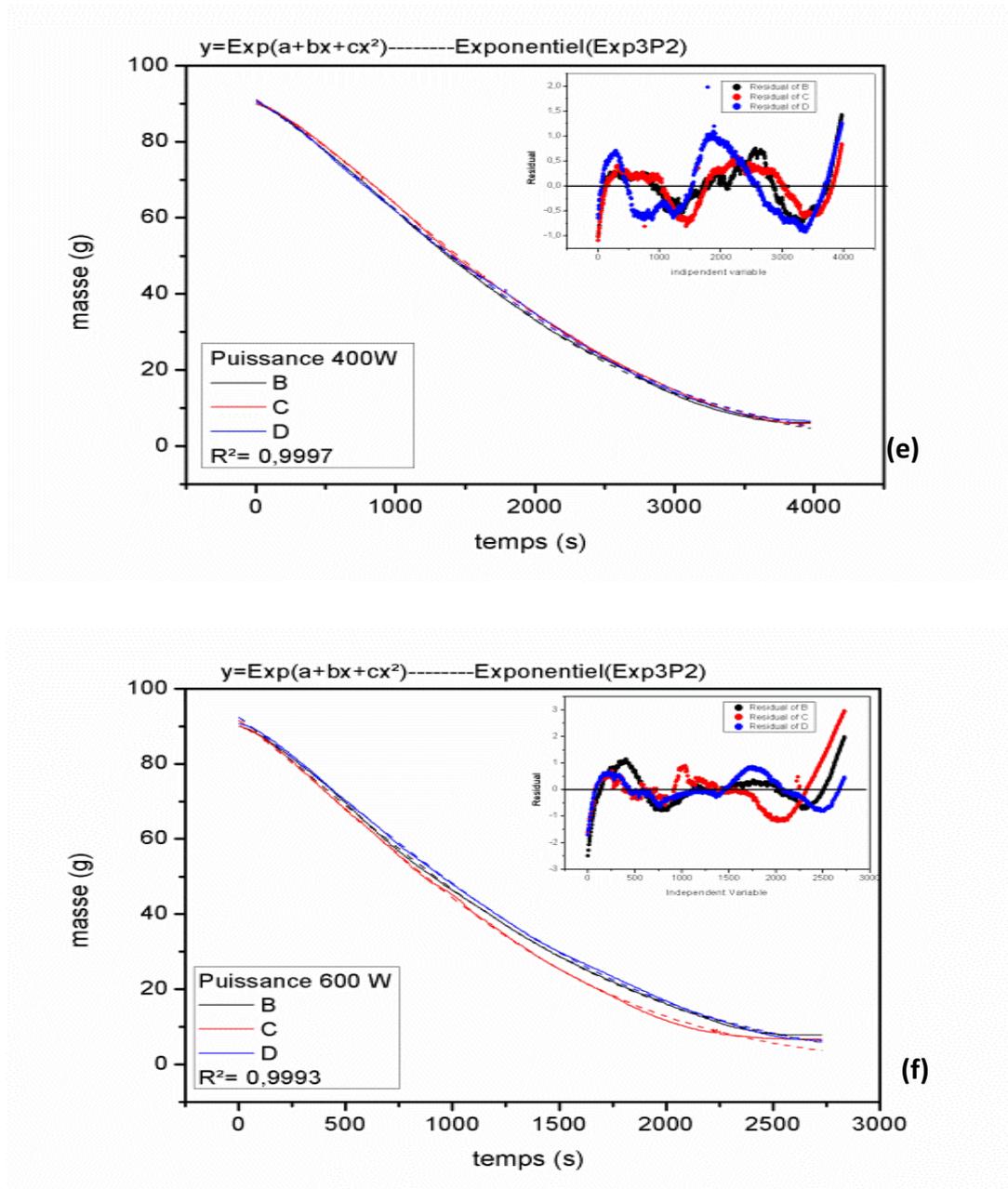
Tableau III : paramètre de la modélisation de la cinétique de séchage par micro-onde

	Nom de modèles							
	Exponentielle (Exp3p2)			R <sup>2</sup>	Exponentielle (exponentielle)			R <sup>2</sup>
	a	b	c		Y <sub>0</sub>	A	R <sub>0</sub>	
<b>200 W</b>	4,485	1,054.10 <sup>-4</sup>	2,917.10 <sup>-8</sup>	0,9993	-49,009	142,134	-1,307.10 <sup>-4</sup>	0,9967
<b>400 W</b>	4,511	-2,549.10 <sup>-4</sup>	1,193.10 <sup>-7</sup>	0,9996	-39,528	135,039	-2,988.10 <sup>-4</sup>	0,9965
<b>600 W</b>	4,52 3	- 4,636.10 <sup>-4</sup>	-2,207.10 <sup>-7</sup>	0,9987	-86,296	122,199	-5,297.10 <sup>-4</sup>	0,9958
<b>800 W</b>	4,521	-6,239.10 <sup>-4</sup>	-4,296.10 <sup>-7</sup>	0,9990	-23,201	119,519	-7,625.10 <sup>-4</sup>	0,9949

D’après les résultats illustrés dans le tableau III et les figures (16, 17, 18, 19, 20, 21, 22 et 23), il s’avère que les valeurs R<sup>2</sup> les plus élevées et les résidus les proche de zéro ont été obtenues avec le modèle polynôme, ce qui permet de le choisir comme étant le meilleur modèle pour décrire la cinétique de séchage du navet pour le procédé de séchage par micro-onde.

### IV.3. Modélisation après l'élimination des valeurs aberrantes

Dans l'étude de la modélisation de la cinétique de séchage, les résultats exploités sont des valeurs brutes, se qui implique automatiquement la présence de quelques valeurs aberrantes dans les puissances 400 et 600 W, ses valeurs ont été éliminées et les résultats ont été représentés dans la figure 24.



**Figure 24 :** Modèle polynôme sans valeurs aberrantes pour les puissances 400 W (a) et 600 W (b).

Les coefficients de détermination ( $R^2$ ) avec et sans les valeurs aberrantes sont représenté dans le tableau IV.

**Tableau IV** : Coefficients de détermination ( $R^2$ ) avec et sans les valeurs aberrantes

Puissances	$R^2$ (avec valeurs aberrante)	$R^2$ (sans valeurs aberrante)
400 W	0,9996	0,9997
600 W	0,9987	0,9993

Les résultats de la figure et du tableau précédents, montrent l'augmentation de  $R^2$  après l'élimination des valeurs aberrantes.

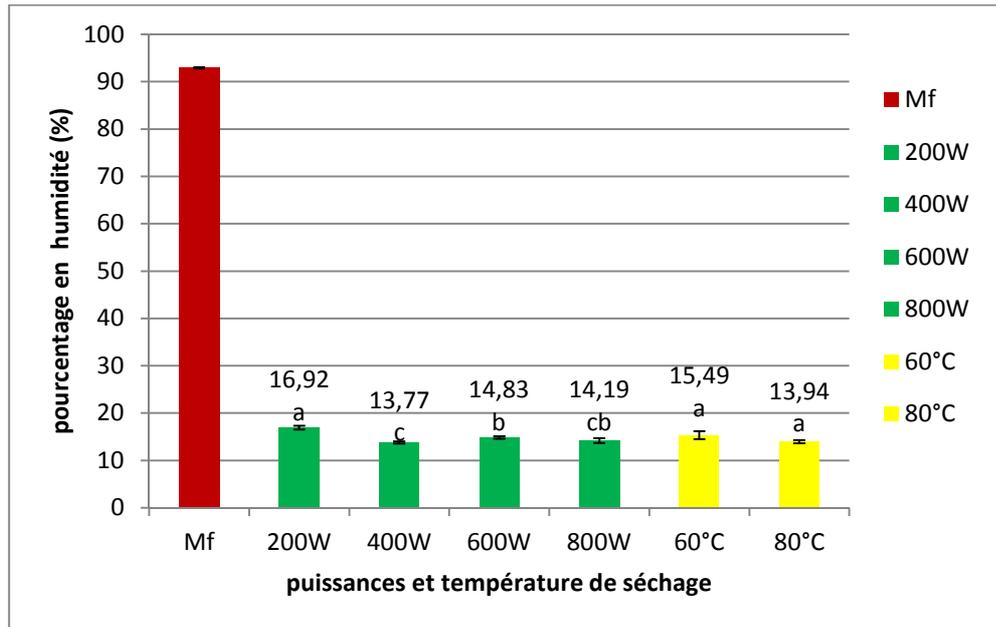
**Tableau V** : Les points éliminés.

Puissances	Essais	Masse (g)	Temps (s)
400 W	1	9,74	3650
		9,26	3435
	2	73	760
	3	8,49	3565
		11,9	3325
600 W	1	62,09	765
	2	44,02	1288
		78,29	840

#### IV.4. Teneur en eau avant et après séchage

Avant et après le séchage du navet blanc, les mesures de la teneur en eau de notre variété a donné les valeurs illustrées dans la figure 1, qui sont de  $92,93 \pm 0,12$  % pour l'échantillon frais, de  $13,94 \pm 0,34^a$  à  $15,35 \pm 0,86^a$  % pour la poudre séchée par étuve et de  $13,77 \pm 0,24^a$  à  $16,92 \pm 0,39^a$  % pour la poudre séchée par micro-onde. Ces résultats se rapprochent de ceux rapportés par **Saeed et al. (2012)** pour la variété du navet blanc ( $88,90 \pm 1,05$  %) et du navet jaune ( $90,03 \pm 1.20$  %) récoltée au Pakistan.

Les résultats de se test montrent que le taux d'humidité a été fortement influencé par les deux méthodes de séchage, étuve et micro-onde. Le taux d'humidité de la matière fraîche a été de 92,93 % est a diminuée a des teneurs extrêmement basse par les deux méthodes jusqu'à atteindre 13.94 et 13.77% respectivement.



**Figure 25 :** Teneur en eau du navet frais et de la poudre séché

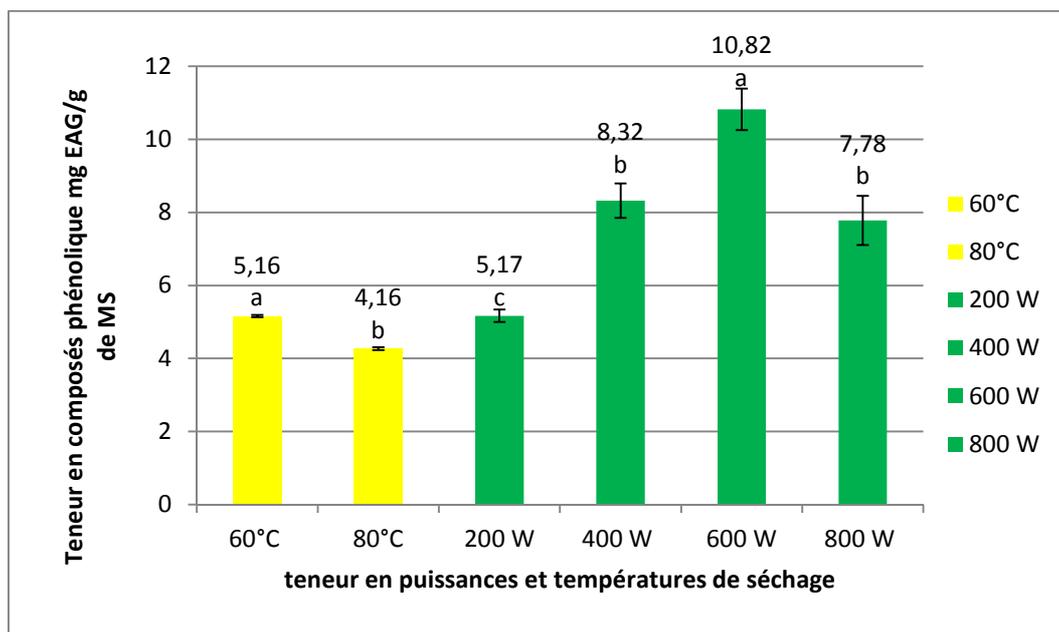
D'après l'étude statistique pour le séchage assisté par étuve, il n'existe pas une différence significative de teneurs en humidité entre les deux échantillons séché à 60 et 80 °C. Pour le séchage assisté par micro-ondes, l'étude a révélé l'existence d'une différence significative entre 200 W et les autres puissances. Ainsi la plus haute teneur en humidité a été enregistrée dans la poudre séchée à 200 W ( $16,92 \pm 0,393$ ).

Ces résultats peuvent être expliqués par le fait que l'élimination rapide de l'eau de la surface saturée de l'eau s'effectue au début du séchage, succédé après par un gradient élevé de température entre la surface et l'intérieur du produit. Cette température élevée de l'air avantage la migration des molécules l'eau à la surface et cela en maintenant une surface complètement saturé. Et enfin la teneur en eau devient très faible au bout d'un certain temps de séchage (**Chua et al., 2001**).

D'après les résultats obtenus par **Sharma et Prasad. (2004)**, les taux de séchage étaient plus élevés au début du processus de séchage et ils ont progressivement diminués à la fin, cela peut être attribué à l'absorption de plus d'énergie par l'eau au niveau de la surface initiale de la matrice qui entraîne le séchage de la surface du produit par la suite, et provoque la diminution de la pénétration de la chaleur à travers cette dernière retardant ainsi le taux de séchage.

#### IV.5. Teneur en polyphénols totaux

Dans le but de caractériser les extraits préparés à partir de la poudre du navet obtenu à différentes températures et puissances de séchage, un dosage des polyphénols totaux a été effectué. La raison principale pour le choix de ces substances réside dans le fait que la majorité des effets pharmacologiques des plantes leur sont attribués. La teneur en polyphénols totaux a été estimée par la méthode de Folin-Ciocalteu pour chaque extrait et les résultats obtenus ont été exprimés en mg équivalent d'acide gallique par g de matière sèche (mg EAG/g MS) comme représenté dans la figure 26.



**Figure 26 :** Teneur en polyphénols totaux des extraits de navets séchées au micro-onde et à l'étuve.

D'après les résultats (figure 26), les teneurs en polyphénols totaux varient largement et significativement ( $p < 0,05$ ) dans les différents extraits obtenus par séchage-assisté par étuve (de  $4,27 \pm 0,03^c$  à  $5,16 \pm 0,03^a$  mg EAG/g MS) et par micro-ondes (de  $5,17 \pm 0,17^b$  à  $10,82 \pm 0,57^a$  mg EAG/g MS). L'extrait de la poudre séchée à 600 W possède significativement la plus haute teneur en polyphénols ( $10,82 \pm 0,57$  mg EAG/g MS), suivi par une teneur élevée ( $p < 0,05$ ) dans l'extrait de la poudre séchée à 60 °C ( $5,16 \pm 0,03$  mg EAG/g MS), pour les deux techniques de séchage, respectivement. Ces teneurs augmentent proportionnellement de 400 à 600 W, et diminuent à des températures et puissance plus élevées (80 °C et 800 W). Cette différence peut être expliquée par la dénaturation des polyphénols sous l'effet de haute température et puissance (Klimczak et al., 2007).

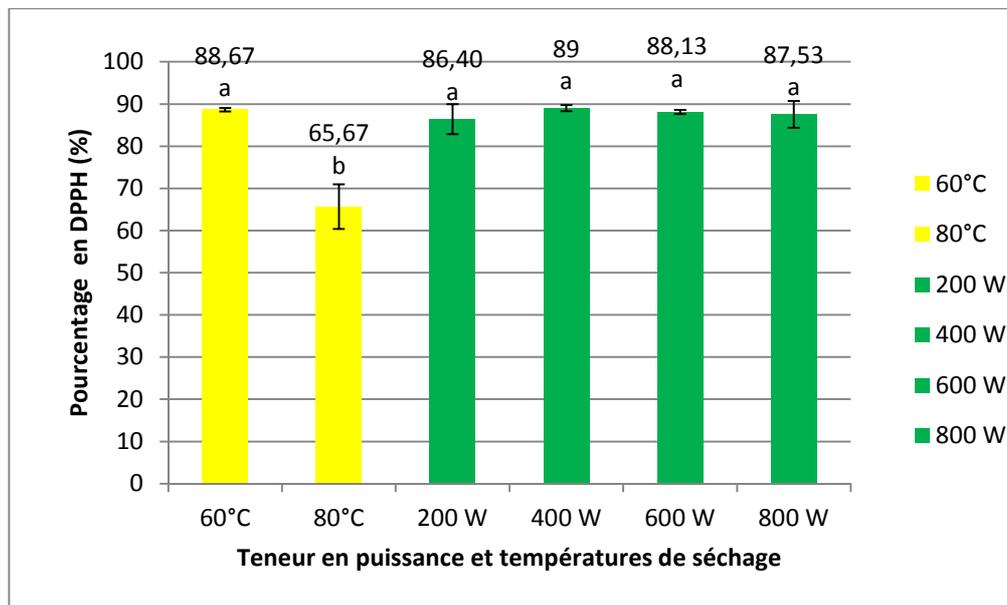
La teneur en composés phénoliques de la poudre séché au micro-onde est très élevée par rapport à celle de l'étuve, ce qui est due au temps de séchage court qui n'endommage pas les tissus végétaux, entraînant plus de composés phénoliques à extraire. Tandis que, le séchage à l'étuve avec une durée significativement plus élevée, détruit le tissu végétal de la matrice étudié et provoque la dénaturation des composés phénoliques, ce qui a diminué leur quantités.

Peu de données bibliographiques concernant la teneur en composés phénoliques du navet sont disponibles. Les résultats de cette étude sont comparables à ceux de l'étude réalisée par **Hihat *et al.*, (2017)**, qui ont constatés que les teneurs les plus élevés en composés phénoliques ont été enregistrés pour les feuilles de coriandre séchées au micro-onde (48,44 mg GAE/g) que celles séchées à l'étuve (26,64 mg GAE/g). Elles sont confirmées aussi par **Jing *et al.* (2010)** qui affirment que la plus haute teneur en composés phénoliques (92,5 mg/100 g MS) a été enregistré pour les échantillons de patate douce séchés au micro-onde.

#### **IV.6. Evaluation de l'activité antioxydante**

Les résultats d'une seule méthode ne donnent que des suggestions réduites sur les propriétés antioxydantes des extraits. La combinaison de plusieurs techniques complémentaires, associant des mécanismes différents serait idéale pour une évaluation efficace et complète des potentiels antioxydants chez une ou plusieurs espèces. Trois méthodes ont été employées : piégeage du radical libre DPPH et évaluation du pouvoir réducteur. Les résultats exprimés en tant que pourcentage de l'activité anti-radicalaire ont été représenté dans la figure 3.

## ✓ DPPH

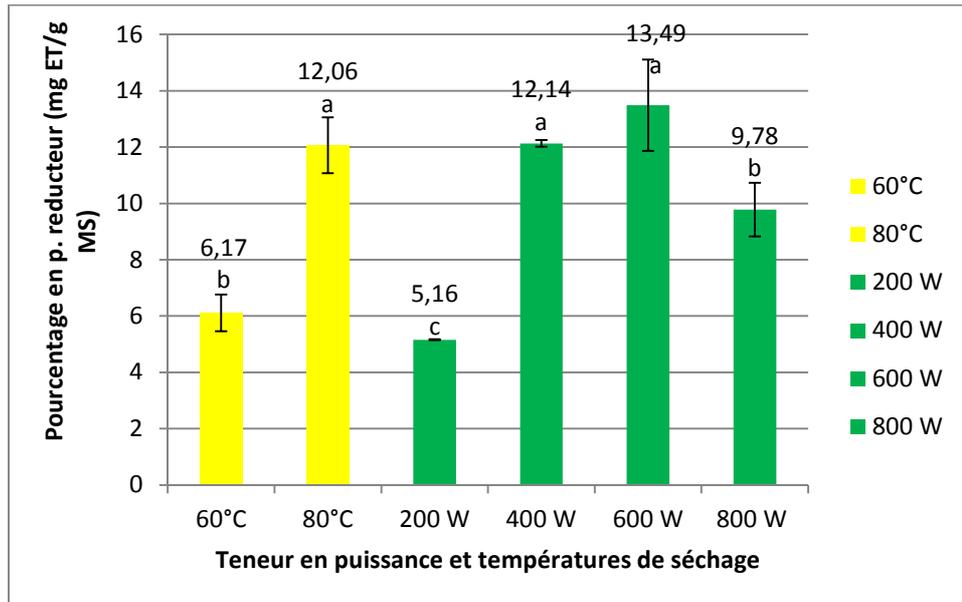


**Figure 27 :** Pourcentage d'inhibition de DPPH des extraits de navets séchées au micro-onde et à l'étuve

D'après les résultats (figure 27), les pourcentages de l'activité antiradicalaire (DPPH) varient dans les différents extraits obtenus par séchage-assisté par étuve (de  $65,66 \pm 5,32^b$  à  $88,66 \pm 0,41^a$  %) et par micro-ondes (de  $86,40 \pm 3,55^a$  à  $89 \pm 0,72^a$  %) d'une manière significative ( $p < 0,05$ ) et non significative ( $p > 0,05$ ), respectivement. Ces résultats sont comparables à ceux d'Arslan *et al.* (2011), qui ont révélés que la tomate présente une bonne activité anti-radicalaire (DPPH) qui varie de 53,08 à 78,06 % pour les échantillons après séchage par étuve et micro-ondes, respectivement. D'après ces résultats on constate que le paramètre température a une influence sur l'activité antiradicalaire (DPPH) contrairement au paramètre puissance.

✓ **Pouvoir réducteur**

La figure 5 montre des valeurs allant de 5,16 à 13,49 mg ET/g MS de l'activité réductrice des extraits de la matrice étudiée. Le pouvoir réducteur le plus élevé ( $p < 0,05$ ) est celui de l'extrait de la poudre séchée à 400 et 600 W ( $12,14 \pm 0,12$  et  $13,49 \pm 1,62$  mg ET/g MS) pour le séchage assisté par micro-onde, et celui de la poudre séchée à 80 °C ( $12,06 \pm 1,99$  mg ET/g MS) pour le séchage assisté par étuve.



**Figure 28 :** Pouvoir réducteur des extraits de navets séchés au micro-onde et à l'étuve.

L'augmentation du pouvoir réducteur à une température élevée (80 °C) peut être due à la génération et l'accumulation des mélanoidines qui sont des dérivées de la réaction de Maillard et qui peuvent améliorer les propriétés antioxydantes de l'extrait étudié (**Miranda et al. 2009; Hihat et al., 2017**).

Les résultats de cette partie du travail montrent que les extraits qui possèdent les meilleurs pouvoirs piègeurs vis-à-vis des radicaux libres (DPPH), montrent également un meilleur pouvoir réducteur. Cela témoigne vraisemblablement de la présence dans nos extraits des molécules antioxydantes pouvant intervenir par deux types de mécanisme réactionnel.

De nombreuses études ont été effectuées sur l'effet du séchage par étuve et par micro-onde sur l'activité antioxydante de plusieurs matrices végétales. Certaines de ces études comme le séchage des tomates réalisé par **Arslan et al. (2011)**, affirme que le séchage aux micro-ondes à la puissance 700 W est plus avantageuse par rapport au séchage au soleil et à l'étuve en raison du faible pourcentage de destruction des composés antioxydants. Ce résultat a été soulevé aussi par **Jing et al. (2010)**, les patates douces séchées aux micro-ondes possèdent l'activité antioxydante la plus élevée, alors que l'activité la plus faible a été observée dans des échantillons séchés à l'air chaud.

# Conclusion

Au terme de ce travail la cinétique de séchage du navet a été suivie par deux méthodes, une méthode par micro-onde (200, 400, 600 et 800 W) avec un pas de 5 secondes et l'autre par étuve ventilée (60 et 80 °C) avec un pas de 10 minutes. D'après les résultats obtenus, on a constaté que le séchage assisté par micro-onde réduit considérablement le temps de séchage, en effet le séchage assisté par étuve nécessite 5 heures pour une température minimale 60 °C pour atteindre un poids stable, contre 2 heures pour le séchage aux micro-ondes pour une puissance minimale 200 W.

La présente étude s'est étalée d'une part sur la modélisation des résultats brutes de cette cinétique et d'autre part sur l'évaluation de l'efficacité de ces deux procédés de séchage, micro-onde et étuve, sur les polyphénols totaux, DPPH et pouvoir réducteur.

Les résultats obtenus pour le taux d'humidité, ont révélé qu'il n'existe pas une différence significative entre les deux procédés de séchage. Les teneurs en composés phénoliques ont été plus élevées dans les poudres obtenus par séchage au micro-onde (10,82 mg/g MS) à une puissance de 600 W, par contre la teneur la plus élevée pour la poudre séchée à l'étuve est de 5,18 mg/g MS à une température de 60 °C.

Le pouvoir réducteur le plus élevé pour le séchage par micro-onde est de 13,49 (mg EAA/g MS) à une puissance de 600 W et pour la poudre séchée à l'étuve est de 12,06 (mg EAA/g MS) à une température de 80 °C, les résultats obtenus confirment également une certaine corrélation. Pour l'activité antiradicalaire aux DPPH on a constaté une différence significative entre les poudres séchées aux micro-ondes (200, 400, 600, 800 W) et la poudre séchée à l'étuve à 80 °C mais il n'y a pas eu de différence significative à 60 °C.

Pour la modélisation des résultats brutes de la cinétique de séchage, effectués avec deux modèles, afin d'étudier l'influence de la température (pour l'étuve), puissances (pour micro-onde) en fonction du temps, correspond mieux au modèle de polynôme selon les résultats du coefficient de détermination ( $R^2$ ) et des résidus.

En effet le séchage peut provoquer des changements physiques, chimiques et biologiques, tous ces changements réduisent la qualité du produit et diminuent sa valeur nutritionnelle, donc il est nécessaire d'effectuer d'autres analyses phytochimiques pour les poudres obtenues afin de valider la meilleure méthode de séchage.

# Annexes

## Annexe I : Matériels utilisés

### 1. Appareillage

- Balance de précision AS 220.R2.
- Spectrophotomètre UV-Vis (1800).
- Bain marie
- Étuve ventilé
- Micro\_onde (MaxiPowr)
- Proyeur électrique
- Désiccateur RADWAG MAC 50/NP

### 2. Produits chimiques

- Folin-ciocalteu (PROLABO)
- Tampon phosphate (GPR RECTAPUR)
- Ferricyanure de potassium (k+) (SIGMA-ALDRICH)
- DPPH (SIGMA-ALDRICH)
- Ethanol (80%)

### 3. Solutions utilisées

#### 1) Folin ciocalteu

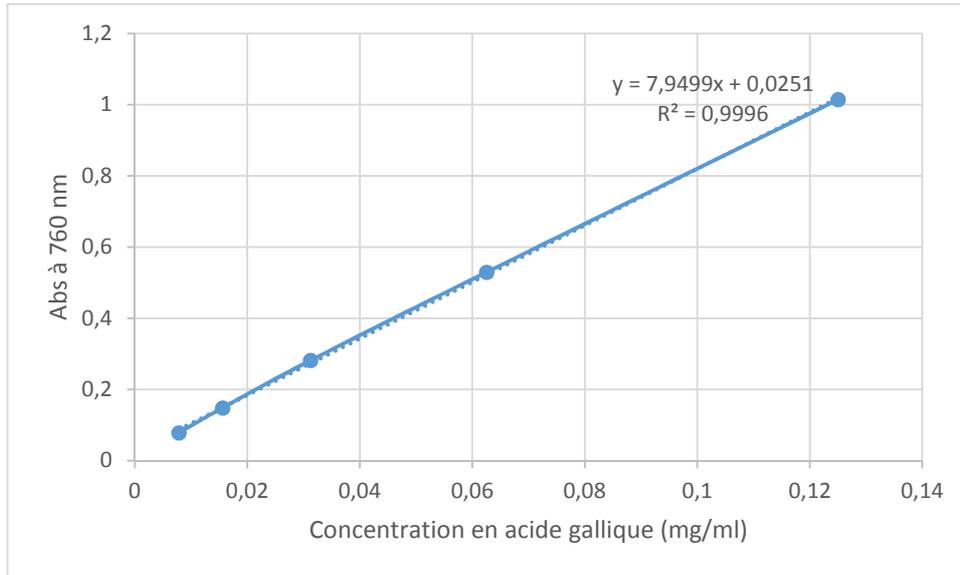
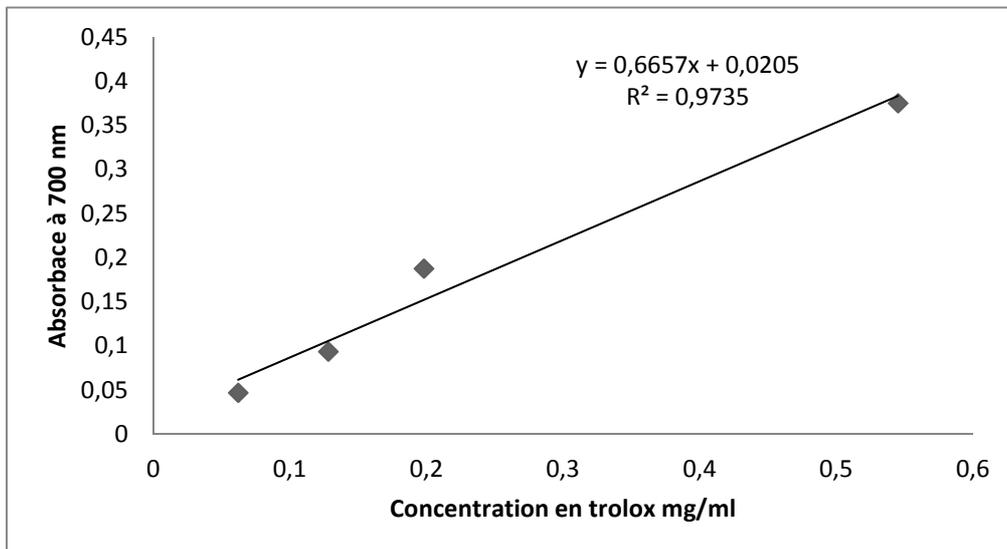
1 ml de folin ciocalteu + 9 ml d'eau distillé

#### 2) Solution mère DPPH

4 mg de poudre DPPH + 100 ml de méthanol pure

#### 3) FeCl<sub>3</sub> à (0.1 %)

0.1 g de FeCl<sub>3</sub> + 100 ml d'eau distillé

**Annexe II : courbe d'étalonnage de l'acide gallique****Annexe III : courbe d'étalonnage de l'acide gallique**

# Références bibliographiques

**Références bibliographiques**

**-A-**

**Achat, S., Tomao, V., Madani, K., Chibane, M., Elmaataoui, M., Dangles, O., Chemat, F., 2012.** « Direct enrichment of olive oil in oleuropein by ultrasound-assisted maceration at laboratory and pilot plant scale », *Ultrasonics sonochemistry* 19, 777-786.

**Alamy T., 2016.** « Le guide pratique des légumes », Éditions Ouest-France, ISBN : 978-2-7373-7013-7, France.

**Arslan D., and Özcan M. M., 2011.** « Drying of tomato slices: changes in drying kinetics, mineral contents, antioxidant activity and color parameters », *Journal of Food*, Vol. 9, No. 3, 229–236.

**-B-**

**Bonazzi C., and Dumoulin E., 2011.** « Quality Changes in Food Materials as Influenced by Drying Processes », *Modern Drying Technology, Vol. 3: Product Quality and Formulation, First Edition.*

**Bonazzi C., Bimbenet J-J., 2018.** « Séchage des produits alimentaires- Principes », *techniques de l'ingénieur.*

**Boizot, N., Charpentier, J.-P., 2006.** « Méthode rapide d'évaluation du contenu en composés phénoliques des organes d'un arbre forestier », *Le cahier des techniques de l'Inra.* pp. 79-82.

**Bouraoui M., Richard P. and Fichtali J., 1994.** « A review of moisture content determination in foods using microwave oven drying », *Food Research International* 26 49-51..

**Bimbenet, J. J., Daudin, J. D., & Wolff, E., 1984.** « Air drying kinetics of biological particles », *In Proceedings of the fourth international drying symposium*, Kyoto, Japan, pp. 249–256.

**Brahmi F., Madani K., Dahmoune F., Rahmani T., Bousbaa K., Oukmanou S. and Chibane M., 2012.** « Optimisation Of Solvent Extraction Of Antioxidants (Phenolic Compounds) From Algerian Mint (*Mentha spicata* L.) », *Pharmacognosy Communications*, Vol. 2 (4).

-G-

**Cartea M.E, Francisco M., Soengas P. and Velasco P., 2016.** « Phenolic Compounds in Brassica Vegetables », *Molecules* 16 251-280.

**Cengel Y. A., 2002** « heat transfert : a partical approach » 2<sup>nd</sup> edition ,McGraw-hill, new York.

**Charreau A., et Cavallé R., 1991.** « Séchage. Appareillage et choix d'un procédé », *Techniques de l'ingénieur*.

**Chua, J. K., & Chou, K. S. 2005.** « A comparative study between intermittent microwave and infrared drying of bioproducts », *International Journal of Food Science and Technology*, 40, 23–39.

**Cohen J.H., Kristal A.R., Stanford J.L., 2000.** « Fruit and vegetable intakes and prostate cancer risk. », *J. Natl. Cancer Inst.* 5; 92 (1) : 61-8.

**Couplan F., 2011.** « Guide nutritionnel des plantes sauvages et cultivées », Editions : Delachaux et Niestle, ISBN : 978-2603017340, France.

**Correia A.F.K, Laro A.C., Zanatta S., Sopo M.H.F. and Vieira T.M.F.S., 2015.** « Effect of temperature, times and materiel thickness on the dehydration process of tomato », *International Journal of Food Science*, pp. 7.

**Catalogue, 2016.** « **Le carnet du Maraîcher** », HM. Clause S.A., France.

-D-

**Dadalı, G., Kılıç Apar, D. and Özbek, B., 2007.** « Microwave drying kinetics of okra », *Drying Technology*, 25, 917-924.

**Doymaz I., 2005.** « Sun drying of figs: an experimental study », *Journal of Food Engineering*, 71 403–407.

**Dudez P., Themelin A. et Reynes M., 1996.** « le séchages solaire a petit échelle des fruits et des légumes », *expériences et procéder*. Édition de get, pp.157.

**Dupont F. et Guignard J-L., 2015.** « Botanique – les familles des plantes », 16<sup>ème</sup> Edition, Elsevier-Masson, ISBN : 9782294741173.

**Drouzas, A., Tsami, E., Saravacos, G., 1999.** « Microwave/vacuum drying of model fruit gels », *Journal of Food Engineering*, 39, 117-122.

-F-

**Esper A., and Miihlbauer W., 1998.** « Solar Drying - An Effective Means of Food Preservation », *Renewable Energy*, 15 95–100.

-F-

**Feng H., and Tang J., 1998.** « Microwave finish drying of diced apple slices in a spouted bed », *Journal of Food Science*, 63(4), 679–683.

**Fernandes F., Valentao P., Sousa C., Pereira J.A., Seabra R.M., Andrade P.B., 2007.** « Chemical and antioxidative assessment of dietary turnip (*Brassica rapa* var. *rapa* L.) », *Food Chemistry* 105 1003–1010.

-G-

**Gauhar A. Mastekbayeva, Chandika P. Bhatta, M. Augustus Leon and S. Kumar, 1999.** « Experimental studies on a hybrid dryer », *ISES 99 Solar World Congress, Israel*, 4-9 July.

**Georgé S., Brat P., Alter P., Amiot M.J., 2005.** « Rapid determination of polyphenols and vitamin C in plant-derived products », *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53, 1370- 1373.

**Godefroy V., 2011.** « Les Aliments santé et les clés de la nutrition », Éditions : One Plus one, ISBN : 978-2919303038, France.

~~-ff-~~

**Hernandez-Perez J.A., Garcia-Alvarado M.A., Trystram G., Heyd B., 2004.** « Neural networks for the heat and mass transfer prediction during drying of cassava and mango », *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 5 57–64.

**Hihat, S., Remini, H. and Madani, K., 2017.** « Effect of oven and microwave drying on phenolic compounds and antioxidant capacity of coriander leaves », *International Food Research Journal*, 24 (2): 503-509.

**Chua K.J., Mujumdar A.S., Hawlader M.N.A., Chou S.K. and Ho, J.C., 2001.** « Convective drying of agricultural products. Effect of continuous and stepwise change in drying air temperature », *Drying Technology*, 19(8): 1949-1960.

~~-f-~~

**Janas S., Malumba P. and Béra F., 2012.** « Possibilités de prise en compte des phénomènes de transferts internes aux grains lors de la modélisation du séchage en lit fixe du maïs : revue », *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 16 (1), 93-101.

**Jing Y., Jin-feng C., Yu-ying Z. and Lin-chun M., 2010.** « Effects of Drying Processes on the Antioxidant Properties in Sweet Potatoes », *Agricultural Sciences in China*, 9 (10): 1522-1529.

~~-K-~~

**Khama R., 2009.** « etude du séchage de produits agro-alimentaires depoes en couches épaisses», Thèses de Magistère, Université de Oum El Bouaghi. Algérie.

**Krokida M.K., Maroulis Z.B., Saravacos G.D., 2001.** « The effect of the method of drying on the colour of dehydrated », *Inter. J. Food Science and Technology* 36 53–59.

**Klimczak I., Małecka M., Szlachta M., Gliszczyńska-Świgło A., 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-

**Lepage M., 1967.** « Identification and composition of turnip root lipids », *Lipids*. May; 2(3) : 244-50.

-M-

**Martinez S., Pérez N., Carballo J., Franco I., 2013.** « Effect of blanching methods and frozen storage on some quality parameters of turnip greens (“grelos”) », *LWT - Food Science and Technology*, 51 383-392.

**Moate P.J., Dalley D.E., Roche J.R., Gow C.B. and Grainger C., 2002.** « Effects on milk production of increased dietary crude protein by feeding nitrogen-fertilised turnips or lupins to dairy cows in mid-lactation », *Aust. J. Exp. Agric.* 42, 1–6.

**Moore M., Shin M.E., Bruning A., Schindler K., Vershon A. and Winter E., 2007.** « Arg-Pro-X-Ser/Thr is a consensus phosphoacceptor sequence for the meiosis-specific Ime2 protein kinase in *Saccharomyces cerevisiae* », *Biochemistry*, 46 (1) : 271-8

**Mikula S., 1992.** « Mise au point d'un pilote micro-ondes multi-fonction en vue d'un séchage d'algues alimentaires », Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Techniques de LILLE 1, France.

-N-

**Nguyen T.H., 2015.** « Étude expérimentale et modélisation du procédé de séchage des végétaux », Thèse de Doctorat, Université de Bretagne-Sud, France.

**Nout R., Hounhouigan J.D, et Van Boekel T., 2003.** « Les aliments transformations, Conservation et qualité », *Backhuys Publisher*, ISBN 90-5782-124-9.

**Noreen Z., Ashraf M., and Akram N.A., 2010.** « Salt-Induced Regulation of Some Key Antioxidant Enzymes and Physio-Biochemical Phenomena in Five Diverse Cultivars of Turnip (*Brassica rapa* L.) », *J. Agronomy & Crop Science* 196 273–285.



**Orsat V., Changrue V. and Vijaya R.G.S., 2006.** « Microwave drying of fruits and vegetables », *Stewart Postharvest Review*, 6-4.

**Oyaizu M., 1986.** « Studies on Products of Browning Reaction, Antioxidative Activities of Products of Browning Reaction Prepared from Glucosamine », *Jpn. J. Nutr.*, 44 (6) 307-315.

**Ozkan I.A., Akbudak B., Akbudak N., 2007.** « Microwave drying characteristics of spinach », *Journal of Food Engineering*, 78 577–583.



**Polidoro J., 2008.** « Turnips », *Food for Thought: The Science, Culture, & Politics of Food*, Spring.

**Pitrat M., et Foury C., 2003.** « Histoires de légumes : Des origines à l'orée du XX<sup>e</sup> siècle », Éditions Quae, ISBN : 978-2-7380-1066-7, France.



**Saeed M.K., Shaheena Anjum, Ijaz Ahmad, Alim-un-Nisa, Sakhawat Ali, Anjum Zia and Shaukat Ali, 2012.** « Nutritional Facts and Free Radical Scavenging Activity of Turnip (*Brassica rapa*) From Pakistan », *World Applied Sciences Journal*, 19 (3) : 370-375.

**Shafiur Rahman M., 2007.** « Handbook of Food Preservation », Second Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group.

**Sharma A., Chen C.R., Nguyen Va La, 2009.** « Solar-energy drying systems: A reviews », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13 1185-1210.

**Sharma, G., Prasad, S., 2004.** « Effective moisture diffusivity of garlic cloves undergoing microwave-convective drying », *Journal of Food Engineering*, 65, 609-617.

**Stamatios J.B. and Belessiotis V.G., 2004.** « Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs », *Journal of Food Engineering*, 65: 449-458.

-*ℱ*

**Taveira M., Fernandes F., De Phino P.G., Andrade P.B., Pereira J.A., Valentao P., 2009.** « Evolution of Brassica rapa var. rapa L. volatile composition by HS-SPME and GC/IT-MS », *Microchemical Journal* 93 140–146.

**Touati B., 2008.** « Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe verte », Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, Algérie.

**Tsotsas E. and Mujumdar A.S., 2011.** « Modern Drying Technology Volume 3: Product Quality and Formulation », *Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA*, ISBN: 978-3-527-31558-1.

**Tulasidas, T., Raghavan, G., Mujumdar, A., 1995.** « Microwave Drymg of Grapes in a Single Mode Cavity at 2450 Mhz-i: Drying Kinetics. *Drying Technology* », 13, 1949-1971

-*ℱ*

**Vasseur J., 2009.** « Séchage : principes et calculs d'appareils, partie 1 », *techniques de l'ingénieur*, (Ref : article : j2451).

**Vasseur J., 2011.** « Séchage industriel: principes et calculs d'appareils, partie 2 », *techniques de l'ingénieur*, (Ref : article : j2454).

**Vogl-Lukasser B., Vogl C.R. and Reiner H., 2007.** « The Turnip (*Brassica rapa L. subsp. rapa*) in Eastern Tyrol », *Ethnobotany Research & Applications*, (5) 305-317.

**Visavale, G.L., 2012.** « Principles Classification and Selection of Solar Dryers », *in solar drying: Fundamentals, Applications and Innovations*, Ed. Hii, C.L., Ong, S.P., Jangam, S.V. and Mujumdar, A.S., ISBN: 978-981-07-3336-0, Published in Singapore, pp. 1-50.

-y-

**Youcef-Ali S.et N. Moumimi N., 2008.** « Etude expérimentale des séchoirs solaires à plusieurs claies », *Revue des Energies Renouvelables SMSTS'08 Alger*, 273 – 284.

-Z-

**Zhang M., Jiang H. and Li R-X., 2010.** « Recent Developments in Microwave-Assisted Drying of Vegetables, Fruits, and Aquatic Products-Drying Kinetics and Quality Considerations », *Drying Technology*, 28: 1307–1316.

**Anonyme (1):** <https://fr.wikipedia.org/wiki/Navet>.

**Anonyme (2):** [https://www.discoverlife.org/mp/20p?see=EL\\_DP222&res=640](https://www.discoverlife.org/mp/20p?see=EL_DP222&res=640)

**Anonyme (3):** <http://www.france-etuves-store.com/xu058-etuve-de-laboratoire-universelle>.

**Anonyme (4):** <http://tpemicrondes.e-monsite.com/pages/dossier/i-fonctionnement-du-four-a-micro-ondes.html>.

## *Résumé*

---

L'objectif principal de ce travail, est la comparaison entre le séchage du navet par étuve et par micro-onde afin de déterminer la méthode la plus adéquate pour le séchage de cette matrice, et cela par réalisation des cinétiques de séchage en fonction de la perte de masse par l'étuve à 60 et 80°C et au micro-onde à des puissances(200,400,600,800W),en évaluant la teneur en humidité, aux polyphénols et l'activité antioxydante des poudres obtenues par les deux méthodes. Les résultats de la cinétique de séchage révèlent que le la durée de séchage au micro-onde est plus courte que celle à l'étuve. En outre les résultats des différents tests effectués révèlent, que la teneur en humidité diminue fortement pour les poudres obtenues par les deux méthodes de séchage par rapport à la teneur de cette dernière à l'état frais, la teneur en polyphénols et l'activité antioxydante la plus élevée a été enregistrée à 600W pour le séchage assisté par micro-onde. D'après les résultats obtenus, le séchage par micro-onde est la méthode la plus adaptée pour le séchage du navet. Le deuxième objectif consiste à choisir un modèle entre l'exponentielle et le polynôme, qui décrit mieux la cinétique du séchage du navet. D'après les résultats de la modélisation, le modèle polynôme correspond à la cinétique de séchage à 60°C, et le modèle « exponentielle » conviendrait à 80 °C pour l'étuve et pour les cinétiques du séchage par micro-onde et le modèle polynôme correspond à toutes les puissances utilisées.

**Mots clés :** Navet, cinétique de séchage, étuve, micro-onde, modélisation

## *Abstract*

---

The main objective of this work is to compare the drying of turnips by oven and microwave in order to determine the most appropriate method for drying this matrix, by carrying out drying kinetics as a function of mass loss by the oven at 60 and 80 °C and in the microwave at powers (200,400,600,800W), evaluating the moisture content, and polyphenols and the antioxidant activity of the powders obtained by both methods. The results of the drying kinetics show that the microwave drying time is shorter than that of the oven. In addition, the results of the various tests carried out show that the moisture content decreases significantly for powders obtained by both drying methods compared to the fresh content of the latter, the polyphenol content and the highest antioxidant activity was recorded at 600W for microwave assisted drying. According to the results obtained, microwave drying is the most suitable method for drying turnips. The second objective is to choose a model between the exponential and polynomial, which better describes the kinetics of turnip drying. According to the modelling results, the polynomial model corresponds to the drying kinetics at 60°C, and the "exponential" model would be appropriate at 80 °C for the oven and for the microwave drying kinetics and the polynomial model corresponds to all the powers used.

**Keys Words:** Turnip, drying kinetics, oven, microwave, modelling