

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira de Bejaïa
Faculté de Technologie
Département de Génie des procédés



Memoire de fin de cycle

En vue de l'obtention du diplôme Master Génie des procédés, Option : Génie alimentaire.

Thème

<p>Cinétique de séchage assisté par micro-onde et étuve ventilée des gousses de la fève et de petit pois.</p>	
--	--

Membres du jury :

Président : M^{lle} ACHAT S.

Promoteur : M^f MADANI K.

Examinatrice : M^{me} CHIBANI N.

Co-promotrice : M^{me} HADJOUT L.

Réalisé par :

KRIMAT Syla

HAMDI Dassine

Année universitaire : 2018-2019

Remerciement

On remercie en premier lieu Dieu tout puissant de nous avoir accordé la puissance et la volonté pour achever ce travail.

Nos remerciements vont à notre promoteur Mr MADANI K, et notre Co-promotrice M^{me} HADJOUT L pour leurs précieuses aides, leurs orientations et le temps qu'ils nous ont accordé pour notre encadrement.

Nous remercions aussi Tout le personnel du laboratoire B.B.B.S.

Toutes les personnes qui ont participées de près ou de loin à la réalisation de ce Travail.

Merci à tous

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

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

*Mon très cher frère Anis, et ma petite sœur Dounia
Mes grands-mères, oncles, tantes, cousins et cousines paternels et maternels.*

A ma très chère copine Nadjat et ma cousine Imene

A Lydia, Souhila, Meriem

Toute la promotion Génie Alimentaire 2018-2019.

Ma collègue Sylia et toute sa famille.

Et en fin tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Dassine

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

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

*A celui que j'aime beaucoup et qui m'a soutenue tout au long de ce projet : **mon mari Bilal***

Mon très cher frère Ghiles, Ma soeur adorable Asma et mes belles soeurs hanane, nawel, imen, et mes beaux frères nabil et walid

Mes grands-mères, oncles, tantes, cousins et cousines paternels et maternels

Sans oublié ma petite princesse qui n'est pas encore née.

Ceux que j'ai partagé les meilleurs moments de ma vie à vous Mes amis lydia, souhila, meriem.

Toute la promotion Génie Alimentaire 2018-2019.

A Ma binôme Dassine et toute sa famille.

SYLIA

Liste des figures

- Figure 1** : photographies des échantillons lors du séchage à l'étuve ventilée.....11
- Figure 2** : photographies des échantillons lors du séchage assisté par micro-onde.....12
- Figure 3** : photographies du broyeur (A) et du tamiseur automatique (B).....12
- Figure 4** : Evolution de la teneur en eau réduite des gousses de petit pois séchées à l'étuve ventilée (A) et à la micro-onde (B), et des gousses de la fève séchées à l'étuve ventilée (C) et à la micro-onde (D) en fonction du temps.....17
- Figure 5**: Effet des différentes conditions du séchage sur la capacité de gonflement des sous produits de la fève et de petit pois.....21
- Figure 6**: Effet des différentes conditions du séchage sur la capacité de la rétention d'eau des sous produits de la fève et de petit pois.....22
- Figure 7** : Effet des différentes conditions du séchage sur la capacité de rétention d'huile des sous produits de la fève et de petit pois.....24
- Figure 8** : Teneur en chlorophylle « a » et « b » pour les sous produits de petit pois(A) et de fève (B) à des différentes températures et puissances.....26

Liste des tableaux

Tableau 1 : Composition chimique de cosse de petit pois et de fève.....	4
Tableau 2 : Consommation d'énergie des sous produits de fève et de petit pois.....	20
Tableau 3 : Intensité de brunissement des sous produits de fève et de petit pois pour les deux méthodes de séchage.....	25

Liste des abréviations

Abs : Absorbance.

a_w : Activité d'eau.

BBBS : Biomathématiques Biophysique Biochimie et de Scientométrie.

Ca: Chlorophylle *a*.

Cb : Chlorophylle *b*.

FAO : L'Organisation des Nations unies pour l'Alimentation et l'Agriculture.

G : gramme.

H% : Pourcentage d'humidité.

MO : Micro-onde.

MS : Matière Séche.

S: Second.

UV-Vis : Ultra Violet-Visible.

Sommaire

Liste des figures.

Liste des tableaux.

Liste des abréviations.

	Page
Introduction	1
Partie théorique	
Chapitre I : Partie bibliographique	
I.1.Fève et petit pois	3
I.1.1 Historique et répartition géographique	3
I.1.2.Sous produits de l'industrie de la fève et de petit pois	3
I.1.3.Composition chimiques des gousses de la fève et de petit pois	4
I.1.4.Valorisation des sous produit de la fève et de petit pois	5
I.2.Généralité sur le Séchage.....	6
I.2.1.Définition	6
I.2.2.Principe et objectif du séchage	6
I.2.3.Technologies de séchage.....	7
I.2.4.Mécanismes intervenants au cours du séchage	9
I.2.5.Phénomènes qui se produisant au cours du séchage	10
Partie expérimentale	
Chapitre II : Matériel et méthodes	
II.1. Matériel végétal	11
II.2.Séchage	11
II.2.1.Séchage conventionnel	11
II.2.2.Séchage assisté par micro-onde	12
II.2.3.Broyage, tamisage et conservation des poudres	12
II.3.Cinétique de séchage	13
II.4. Consommation d'énergie.....	14
II.5.Etude phénoménologique des poudres obtenues	14
II.5.1. Détermination de la teneur en eau	14
II.5.2. Propriétés fonctionnelles.....	15

II.5.2.1. Capacité de gonflement	15
II.5.2.2.Capacité de rétention d'eau.....	15
II.5.2.3.Capacité de rétention d'huile	15
II.5.3. Indice de brunissement	16
II.5.4.Extraction et dosage de la chlorophylle.....	16

Chapitre III : résultats et discussions

III.1. Cinétique de séchage des cosses de petit pois et de la fève.....	17
III.2.Consommation d'énergie.....	20
III.3.Les propriétés fonctionnelles.....	21
III.3.1.Capacité de gonflement	21
III.3.2.Capacité de rétention d'eau	22
III.3.3.Capacité de rétention d'huile.....	24
III.4.Indice de brunissement	25
III.5.Extraction et dosage de la chlorophylle.....	26
Conclusion.....	28

Références bibliographiques

Annexes.

Résumé.

Introduction

Les grandes quantités de sous-produits générés au cours du traitement des végétaux sont abondantes et représentent un matériau peu coûteux qui a été sous-évalué jusqu'à présent, ils sont utilisés seulement que comme combustible ou fertilisant (**Grigelmo-Miguel, Gorinstein, & Martín-Belloso, 1999**), ces sous produits posent des problèmes environnementaux et économique dus à leurs volumes élevés et à leurs coûts d'élimination. Aujourd'hui, ils sont considérés comme une source de composés fonctionnels. (**Schieber, Stintzing, & Carle, 2001**).

La plupart des légumineuses sont consommées et commercialisées après un processus industriel simple dans lequel la gousse est enlevée et la graine est préparée en tant que nourriture congelée ou fraîche (**Mateos-Aparicio, Redondo-Cuenca, & Villanueva-Suárez, 2012**) Les petits pois (*Pisum sativum* L.) et fèves (*Vicia faba* L.) sont largement consommés et cultivés dans le monde entier. Selon L'Organisation des Nations unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) la production mondiale de pois en 2008 est d'environ 8,3 millions tonnes, et la production de fèves est d'environ 3,6 millions tonnes (**FAO., 2013**). L'estimation des quantités de sous-produits générés à partir de pois et de la fève est de 67% et 70% respectivement. Ainsi, la récolte de ces légumineuses génère environ 5,6 et 2,4 millions tonnes de sous-produits de pois et de fèves, respectivement.

Ces sous-produits peuvent être considéré comme des matières premières dans les industries cosmétiques, pharmaceutiques mais aussi alimentaires pour l'extraction de composants valables sur le plan nutritionnel et des ingrédients fonctionnels principalement les colorants, les antioxydants, et les fibres alimentaires (**Galanakis, 2012**) ; (**Laufenberg, Kunz, & Nystroem, 2003**). Ces sous produits nécessitent souvent, avant d'être utilisé, une opération de préservation permettant leur stockage, leur transport, et facilitant leur transformation (**ALLAF, MOUNIR, & ALLAF, 2012**).

Le séchage est l'une des principales techniques de préservation des produits agricoles et alimentaires, c'est le processus d'élimination de l'humidité dans le produit jusqu'à certaine valeur-seuil. De cette façon, le produit peut être stocké pendant une longue période (**Alibas, 2007**). Le séchage conventionnel est largement utilisé dans l'industrie des produits alimentaires, mais cette méthode prend beaucoup de temps. Par conséquent, des méthodes de séchage avancées sont souvent recommandées pour réduire le temps et les coûts de séchage notamment le séchage aux micro-ondes(**Sumnu, Sahin, & Sevimli, 2005**). Etant données les

très grandes variabilités et diversité des produits alimentaires et biologiques, le meilleur moyen de caractériser le comportement du séchage d'un produit consiste à mesurer expérimentalement sa cinétique de séchage (**Bonazzi & Bimbenet, 2003**).

Dans un contexte de préservation des ressources, la conservation des sous produits ainsi que leur revalorisation dans l'industrie alimentaire, cosmétique ou pharmaceutique suscite un intérêt social, économique et scientifique croissant.

Afin de contribuer à la récupération des sous produits de la fève et de petit pois et de remédier au manque de connaissance de tous les aspects en Algérie, une étude en cours a été réalisée conçu dans un premier temps pour le suivi des cinétiques de séchage, assisté par microonde et étuve ventilée, des gousses de la fève et de petit pois (variété locale). D'autre part, pour comparer l'effet des deux méthodes de séchage (microonde et conventionnelle) sur propriétés fonctionnelles et la couleur des sous produits.

Afin de mieux situer le contexte dans lequel s'inscrit ce travail, une revue de l'état de l'art est présentée sur la fève et le petit pois et leurs cosses ainsi qu'un aperçu sur le séchage. Le deuxième volet est voué au suivi des cinétiques de séchage de la cosse des pois et des fèves au four micro-onde à différentes puissances et à l'étuve ventilée à différentes températures. Dans le but de comparer l'efficacité des deux méthodes, une évaluation de l'effet de séchage sur la qualité de la cosse est réalisée par le dosage des propriétés fonctionnelles (le gonflement, rétention d'eau et rétention d'huile), indice de brunissement et la chlorophylle.

I. Partie bibliographique

I.1. Fèves et petits pois

I.1.1. Historique et répartition géographique

Les légumineuses à graines étaient parmi les premières espèces domestiquées dans le croissant fertile dont on retrouve encore certains restes archéologiques vieux d'environ 12 000 ans pour les plus anciens. Les écrits issus de la Rome antique rapportent de nombreux témoignages de l'utilisation des légumineuses à graines dans les rations alimentaires, qu'il s'agisse des fèves, de la lentille ou du pois (Duc, Mignolet, Carrouée, & Huyghe, 2010).

La fève et le pois sont les plus vieilles espèces légumières introduites en agriculture (10000ans). La fève figure parmi les légumineuses les plus anciennement cultivées (Bougoufa, Guendouzi, & Hamitou, 2018). A partir de son centre d'origine elle s'est propagée vers l'Europe le long du Nil, jusqu'en Ethiopie et de Mésopotamie vers l'Inde. L'Afghanistan et l'Ethiopie deviennent par la suite les centres secondaires de dispersion. En Egypte des grains de fève en était trouvés dans les tombes de la XXIIe dynastie des pharaons (Abdelkader & Ouadah, 2016).

Les premières traces de cultures du pois datent du début du Néolithique et a accompagné les céréales dans l'apparition de l'agriculture au Proche-Orient. Il était dans l'Antiquité et au moyen âge un aliment de base en Europe et dans le bassin méditerranéen. L'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation (FAO) considère l'Ethiopie et l'Asie occidentale comme centre de diversification, avec des centres secondaires dans le sud de l'Asie et la région méditerranéenne. Actuellement, on trouve (*Pisum sativum* L.) dans tous les pays tempérés et dans la plupart des hautes terres tropicales (Brink, Belay, & De Wet, 2006).

I.1.2. Sous produits de l'industrie de la fève et de petit pois

Les légumineuses sont des plantes dont les fruits sont contenus dans des gousses. La plupart des légumineuses, lentilles, pois, fèves, etc..., sont commercialisées après un processus industriel simple qui est l'élimination des gousses (Mateos-Aparicio Cediél, Mateos-Peinado, Jiménez Escrig, & Rupérez Antón, 2008). Ces dernières restent après l'isolement du constituant principal, en représentant un matériau peu coûteux, qui a été sous-évalué jusqu'à présent, étant seulement utilisé comme combustible, engrais ou alimentation animale (Grigelmo-Miguel & Martín-Belloso, 1999).

Selon le FAO, la production mondiale de fève en 2008 est de 3,6 millions de tonnes, et cette récolte génère environ 2,4 millions de tonnes de sous-produits qui posent un problème économique et environnemental (Fao, 2008).

Aujourd'hui, les gousses de la fève et de petit pois sont une source importante de composés qui peuvent être utilisés en raison de leurs propriétés nutritionnelles et technologique, et ils sont considérés comme une source possible de composants fonctionnels(Schieber, Stintzing, & Carle, 2001).

I.1.3. Composition chimique des gousses de la fève et de petit pois

Les sous-produits de légumineuses, cosse de pois et fèves, peuvent être considérés comme une source de fibres alimentaires car c'est le principal constituant, plus de 50% pour la cosse de pois et plus de 40% pour la gousse de la fève. En outre, ces sous-produits sont proposés comme source naturelle riche en sucres solubles en raison de leur teneur considérablement plus élevée par rapport aux autres sous-produits et légumineuses. Les gousses de la fève et de petit pois se sont révélées contenir des quantités remarquable en protéines et des quantités non négligeable en minéraux particulièrement le potassium, le calcium et le fer(Mateos-Aparicio, Redondo-Cuenca, Villanueva-Suárez, Zapata-Revilla, & Tenorio-Sanz, 2010).

Tableau 1 : Composition chimique de cosse de petit pois(Bravo & Saura-Calixto, 1998) et de la fève(Wadhwa, Kaushal, & Bakshi, 2006).

Composition	Teneur (g/100g de Ms)	
	Gousse de petit pois	Gousse de la fève
Protéines	10.8	13.6
Graisses	1.3	8.5
Glucides	22.7	26.6
Saccharose	7.9	6.1
Glucose	11.9	10.3
Galactose	0.8	0.3
Fructose	1.2	4.1
Arabinose	0.9	1.3
Amidons	3.7	11.7
Fibres diététiques	58.6	40.1
Fibres diététiques soluble	4.2	30.8
Fibres diététiques insoluble	54.4	9.3
Cendres	6.6	6.3

Teneur en macroéléments (g/100g de Ms) et en oligo-éléments (mg/100g de Ms)		
Potassium	1.03	0.29
Sodium	0.14	0.09
Calcium	0.77	0.34
Magnésium	0.21	0.12
Manganèse	0.27	0.13
Zinc	0.16	0.14
Potassium	1.03	0.29
Fer	1,20	0,65

I.1.4. Valorisation des sous produits de la fève et de petit pois

A premier abord, les cosses de fève et de petit pois semblent un sous-produit sans grand intérêt alimentaire. Des analyses plus approfondies montrent la présence des composés phénoliques des pigments, des fibres et des minéraux dont la valorisation en tant qu'ingrédients alimentaires ou fonctionnels pourraient être d'un grand intérêt économique (**Mateos-Aparicio, Redondo-Cuenca, & Villanueva-Suárez, 2012**).

L'application des méthodes de transformation modernes avec l'incorporation de la connaissance traditionnelle fournira une base substantielle pour l'exploitation commerciale de ces sous-produits, pour développer de nouvelles nourritures originales aussi bien que pour l'usage dans l'industrie pharmaceutique (**Tiwari, Gowen, & McKenna, 2011**).

Les cosses pourraient être importantes dans l'industrie alimentaire comme ingrédient riche en fibres alimentaires. C'est une source riche en cellulose, avec une proportion non négligeable en pectine. Ces deux composés sont importants dans la nutrition humaine, mais les effets potentiels attendus de tel sous-produit seraient principalement liés à ceux associés aux fibres insolubles, tel que la régulation des fonctions intestinales et de rétention d'eau (**Mateos-Aparicio et al., 2010**).

L'activité antioxydante des composés phénoliques est d'un intérêt particulier dans le développement de nouveaux produits ou bio additifs, de grandes propriétés fonctionnelles. En plus, les extraits riches en composés phénoliques pourraient améliorer d'une façon très appréciable la qualité des produits alimentaires aux plans de la couleur, du goût et de la saveur des aliments frais et/ou transformés (**Scalbert, Manach, Morand, Rémésy, & Jiménez, 2005**).

I.2. Généralités sur le séchage

I.2.1. Définition du séchage

Le séchage est l'une des méthodes les plus anciennes de conservation des aliments. Pendant cette méthode l'eau est retirée d'un aliment, ce qui réduit le potentiel de croissance microbienne et les réactions chimiques indésirables (par exemple : brunissement enzymatique), ce qui augmente la durée de conservation (**Gowen, Abu-Ghannam, Frias, & Oliveira, 2008**).

Le séchage est une opération importante dans le domaine agricole et industriel. Il consiste à éliminer totalement ou partiellement l'eau d'un produit humide autre que son eau d'hydratation. (**Bimbenet, 1978**).

I.2.2. Principe et objectif du séchage

- **Principe**

Le séchage est une opération consistant à retirer une partie du solvant (le plus souvent l'eau), d'un corps, par vaporisation de ce solvant, le produit final dit « sec » étant obtenu sous une forme solide de taille variable, une opération de séparation thermique, dans le sens qu'il faut fournir l'énergie de vaporisation du solvant, pour qu'il quitte le produit sous forme de vapeur (**Vasseur, 2009**).

Selon (**Bonazzi & Bimbenet, 2008**) c'est l'évaporation de l'eau d'un produit pour aboutir à un produit sec.

- **Objectif**

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

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

I.2.3. Technologies de séchage

Le séchage est une opération de transfert couplé de chaleur et de masse pour laquelle il est nécessaire de fournir de l'énergie. Plusieurs types de séchoirs et de méthodes de séchage, ont été adaptés à différentes situations d'utilisation facile et pratique, les paramètres opératoires des procédés classiques de séchage peuvent être aisément contrôlés (**Mounir, Téllez-Pérez, Alonzo-Macías, & Allaf, 2014**).

I.2.3.1. Au soleil

Le séchage au soleil s'est largement développé dans les zones arides ou semi arides qui présentent des conditions climatiques optimales : une saison sèche avec un fort ensoleillement, une faible pluviométrie, une hygrométrie peu élevée. Le séchage s'effectue sur le sol, sur des nattes, sur des rochers plats, ou bien sur les toits des maisons. Ce système présente deux principaux avantages pour les communautés : peu de travail et pas d'investissement. Mais, très souvent, les résultats obtenus sont médiocres car les produits sont souillés de sable et de poussière. Ils subissent les attaques des animaux, des insectes et des micro-organismes. Les pertes sont ainsi importantes. De plus, les produits s'abîment, sèchent trop ou pas assez, ce qui dégrade fortement leur qualité (**Dudez, Thémelin, & Reynes, 1996**).

I.2.3.2. Séchage solaire

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 (**Visavale, 2012**). Beaucoup de recherches sur la modélisation mathématique et les études expérimentales ont été menées sur les processus de séchage solaire en couches minces pour divers légumes et fruits, comme le raisin (**Yaldiz, Ertekin, & Uzun, 2001**), les abricots (**Toğrul & Pehlivan, 2002**), le poivron vert, les haricots vert (**Yaldız & Ertekyn, 2001**) la pistache (**Midilli & Kucuk, 2003**), le poivron rouge (**Akpinar, 2006**) et la poire (**Lahsasni, Kouhila, Mahrouz, & Jaouhari, 2004**).

I.2.3.3. Lyophilisation

La lyophilisation (cryodessiccation) est un procédé de conservation par dessiccation sous vide de produits congelés. La perte en eau est principalement obtenue en sublimant la glace sous pression réduite; il y a alors passage direct de l'état solide à l'état gazeux. Un cycle

de lyophilisation se divise en trois étapes : la congélation, où les produits sont réfrigérés à des températures comprise entre $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. La congélation peut-être réalisée en dehors du lyophilisateur (c'est le cas de nombreuses applications industrielles), la dessiccation primaire qui est réalisée sous vide. C'est l'étape pendant laquelle une partie de l'eau congelée se sublime (pas d'eau en phase liquide) et la dessiccation secondaire, qui permet d'extraire par désorption les molécules d'eau, durant cette phase, les produits peuvent être chauffés jusqu'à des températures positives. À la fin du cycle, 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. C'est un procédé de conservation permettant de préserver des denrées alimentaires périssables et des substances biologiques et chimiques dites fragiles. (Jayaraman & Gupta, 2006)

I.2.3.4. Séchage à l'air chaud

Au-delà de l'utilisation de l'énergie solaire pour le séchage, diverses technologies de déshydratation ont été développées au début du XXe siècle. Elles sont basées sur l'utilisation d'une source de chaleur artificielle. Le terme « déshydratation » a été donné aux méthodes de séchage dans des conditions contrôlées. Le premier procédé de séchage artificiel connu des aliments est apparu au XVIIIe siècle. Des légumes traités dans l'eau chaude ont ensuite été placés dans un four chaud pour le séchage (Miller & Ratti, 2009). Actuellement, la plupart des fruits et des légumes sont déshydratés par la technique du séchage à l'air chaud, qui est souvent la plus simple et la plus économique. Les différents types de séchoirs qui ont été conçus, fabriqués et utilisés sont basés sur cette technique. Dans ce procédé, l'air chauffé est mis en contact avec le matériau humide à sécher pour faciliter le transfert de chaleur et de masse. Les transferts sont essentiellement convectifs. Deux aspects importants du transfert de masse sont le transfert de l'eau vers la surface du produit et l'élimination de la vapeur d'eau à partir de la surface (Chakraverty, Mujumdar, & Ramaswamy, 2003).

I.2.3.5. Séchage assisté par micro-onde (MO)

Le chauffage par micro-onde est identique à celui du chauffage haute fréquence et se caractérise par l'absorption d'un rayonnement électromagnétique par le produit à chauffer (Charmond, 2009). Les techniques de séchage micro-ondes ont prouvé leurs efficacités pour un certain nombre de produits agricoles tels que les herbes (Ozkan, Akbudak, & Akbudak, 2007). Les micro-ondes sont des champs électromagnétiques, leurs gammes de fréquence est aligné de 300MHZ à 300GHZ (Jain, Jain, Pandey, Vyas, & Shukla, 2009); La

fréquence réglementaire, quel que soit l'usage (domestique, médical ou industriel), est de 2450 MHz (Colacino, Nun, Colacino, Martinez, & Lamaty, 2008). Les micro-ondes sont utilisés comme vecteurs d'énergie (Anthony et al., 2002; Stephen & Anthony, 2002). Cette application est l'action directe de vagues sur matière qui est capable d'absorber une partie d'énergie électromagnétique et la transformer en chaleur, Il est associé à un séchage à l'air chaud des solides. La génération de chaleur par micro-ondes se porte, surtout sur les parties humides, donc internes, du produit, accélérant et homogénéisant le séchage (BONAZZI & BIMBENET, 2003).

I.2.4. Mécanisme intervenant au cours du séchage

Le séchage est une opération complexe qui met en jeu deux phénomènes physiques couplés, à savoir : le transfert de matière (d'eau sous forme de vapeur) s'effectuant du produit vers l'air et celle de chaleur s'effectuant de l'air vers le produit (Belit, Haddar, & Taib, 2016)

I.2.4.1. Transfert de chaleur

En utilisant une source d'énergie extérieure, la chaleur est diffusée dans le produit sous l'effet du gradient de température. Le séchage fait appel aux trois modes de transfert de chaleur (BONAZZI & BIMBENET, 2003), à savoir :

- Par rayonnement : Dans ce cas le produit à sécher est exposé à un rayonnement infrarouge ou micro-onde ;
- Par convection : Dans ce cas le produit à sécher reçoit un courant gazeux chaud qui fournit la chaleur nécessaire à l'évaporation du liquide et entraîne la vapeur formée ;
- Par conduction : Dans ce cas le mécanisme se base sur un contact direct du produit avec une surface chauffante sur laquelle il est posé.

I.2.4.2. Transfert de matière

Au sein du produit considéré comme milieu poreux, l'eau est transférée sous forme liquide et/ou vapeur, selon des mécanismes divers qui peuvent se combiner (Mujumdar & Devahastin, 2000). Il est généralement admis que le transport capillaire est l'un des mécanismes fondamentaux dans les produits poreux riches en eau (Zogzas, Maroulis, & Marinos-Kouris, 1994).

Dans les produits alimentaires, on préfère souvent attribuer le transport d'eau à une diffusion d'eau liquide sous l'effet du gradient de concentration. L'évolution de teneur en eau s'exprime en fonction du gradient de teneur en eau et d'une diffusivité globale qui regroupe

les différents phénomènes de transport, dans une loi analogue à la seconde loi de Fick(ALLAF, MOUNIR, & ALLAF, 2012)

I.2.5. Phénomènes qui se produisant au cours du séchage

Les interactions entre l'eau et les autres constituants dépendent de la mobilité de l'eau et des solutés, entraînant des réactions, des transformations physiques, des phénomènes mécaniques lors du séchage, du stockage et de la consommation.

- **Réaction biochimique**

Il s'agit des réactions de Maillard, de l'oxydation de vitamines et de matières grasses, de la dénaturation des protéines, de réactions enzymatiques,... etc.(BONAZZI & BIMBENET, 2003)

- **Phénomènes mécaniques**

L'opération du séchage doit être menée de telle façon que la qualité du produit soit préservé à la fin de l'opération. La majorité des produits agroalimentaires sont modifiés par le séchage causé des phénomènes mécaniques qui se produisent au cours de cette opération et parmi ces phénomènes on trouve(Bonazzi, Dumoulin, & Bimbenet, 2008).

- ✓ Les phénomènes de migration des solutés vers la surface ;
- ✓ Migration de matière grasse ;
- ✓ Le croutage, les fissures ;
- ✓ Les déformations.

- **Transfert physique**

Il s'agit de la diminution de l'activité de l'eau, transition vitreuse, fusion de la matière grasse, l'évaporation de constituants volatils, migration ou rétention de constituants volatils (Bonazzi & Bimbenet, 2008).

II. Matériel et méthodes

II.1. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé dans notre étude, est le petit pois (*Pisum sativum* L.) et la fève (*Vicia faba* L.), a été acheté le mois de février 2019 dans le marché local de la ville de Bejaia située au Nord-est de l'Algérie, les parties qui font l'objet dans cette recherche sont les gousses.

II.2. Séchage

Avant le séchage et une fois au laboratoire de Biochimie, Biophysique, Biomathématique et Scientométrie (BBBS) de l'université Abderrahmane Mira de Bejaia., un tri préliminaire a été effectué manuellement (élimination des gousses cassées et endommagées, portant des taches, pourries ou touchées par des insectes nuisibles). Une fois le tri est terminé les pois et les fèves ont été lavés avec l'eau de robinet, puis écosés, et les cosses vides ont été récupérées et coupées en fins morceaux d'environ 1 cm² et de 0.2 cm d'épaisseur pour le petit pois et de 0.3 cm d'épaisseur pour la fève (la mesure a été réalisée en utilisant le pied à coulisse). Pour sécher deux dispositifs ont été employés :

II.2.1. Séchage conventionnel

Pour le séchage conventionnel, des échantillons de 100 g de cosses de petit-pois et de fève ont été étalés sur des assiettes en aluminium en monocouche, ensuite séchés à l'étuve ventilée (NUVE FN 400P TURQUIE) à quatre températures différentes (40, 60, 80 et 100 °C). La perte de masse a été suivie périodiquement, jusqu'à avoir une valeur constante, et les essais ont été réalisés en triple pour chaque température.



Figure 1 : photographies des échantillons lors du séchage à l'étuve ventilée.

II.2.2. Séchage assisté par micro-onde

La même méthode que la précédente a été réalisée pour le séchage au micro-onde, où les fins morceaux de cosses ont été étalés sur une assiette en verre, ensuite séchés au micro-onde de marque Maxi Power pour quatre puissances différentes (300, 500, 700 et 900 W). La perte de masse a été suivie périodiquement jusqu'à avoir une valeur constante, et les essais ont été réalisés en triple pour chaque puissance.



Figure2 : photographies des échantillons lors du séchage assisté par micro-onde.

II.2.3. Broyage, tamisage et conservation des poudres

Les échantillons séchés ont été broyés à l'aide d'un broyeur électrique de type (IKA model A11 basic). Les poudres obtenues ont été tamisées à l'aide d'un tamiseur automatique de type (Retsch AS200) jusqu'à avoir une granulométrie de 250 nm. Après broyage et tamisage, les poudres ont été conservées dans des boîtes en verre, hermétiquement scellées, à l'abri de la lumière et de l'humidité pour les utiliser ultérieurement.

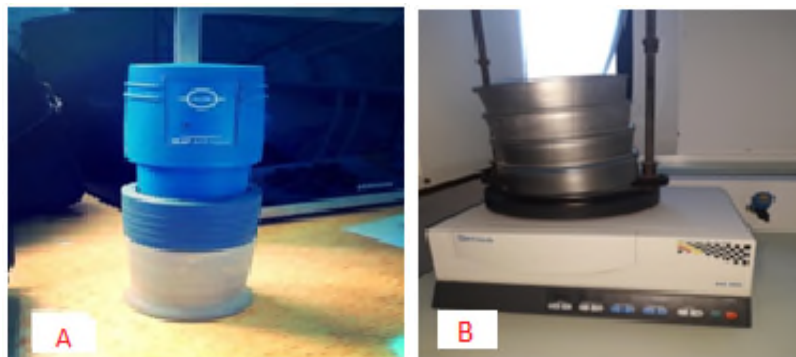


Figure3 : photographies du broyeur (A) et du tamiseur automatique (B)

II.3. Cinétique de séchage

Lors de l'opération de séchage, il se produit un double transfert : thermique et de masse. Ce qui fait que l'air à sa sortie a une humidité plus grande tandis que sa température sèche a diminué. De son côté le produit va diminuer son humidité relative et croître sa température sèche. Pour illustrer ces mouvements de transfert, il existe plusieurs courbes caractéristiques dites "courbes de séchage". On entend par courbes de séchage les courbes représentant les variations de la teneur en eau en fonction du temps :

$$X = f(t) \dots \dots \dots (1)$$

La teneur en eau des échantillons à tout instant t a été transformée en teneur en eau réduite (Darvishi et al., 2014). Cette dernière est calculée selon l'équation (2)

$$Xr = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \dots \dots \dots (2)$$

Avec

M_t : la teneur en eau de l'échantillon à tout instant t (kg d'eau/kg de matière sèche);

M_0 : la teneur en eau initiale (kg d'eau/kg de matière sèche);

M_e : la teneur en eau à l'équilibre.

La teneur en eau réduite a été simplifiée par l'équation (3) parce que M_e est relativement négligeable comparativement à M_t et M_0 (Igor, Clement, Kouakou, & Emmanuel, 2015).

$$Xr = \frac{M_t}{M_0} \dots \dots \dots (3)$$

Avec

M_t : la teneur en eau de l'échantillon à tout instant t (kg d'eau/kg de matière sèche);

M_0 : la teneur en eau initiale (kg d'eau/kg de matière sèche);

II.4. Consommation d'énergie

L'optimisation de l'opération de séchage doit répondre à deux impératifs essentiels qui sont la consommation restreinte de l'énergie nécessaire et la sauvegarde de la qualité biologique du produit séché.

La consommation d'énergie a été calculée selon des équations (4) pour le séchage par convection et (5) pour le séchage par micro-ondes (**Maskan, 2017**).

$$E_{\text{étuve}} = Avp_a C_a \Delta Tt \dots \dots \dots (4)$$

$$E_{\text{microonde}} = Pt \dots \dots \dots (5)$$

Où

$E_{\text{étuve}}$: est la consommation totale d'énergie de séchage assisté par étuve ventilée système (kWh),

$E_{\text{microonde}}$: la consommation totale d'énergie de séchage assisté par microonde (kWh),

A est la surface de la section du plateau où l'échantillon est placé (m^2),

V : est la vitesse de l'air (m / s),

P : est la densité de l'air (kg / m^3),

C_a : est la chaleur spécifique de l'air ($kJ / kg \text{ } ^\circ C$),

ΔT : est la différence de température ($^\circ C$),

T : est le temps de séchage total (h) et P est la puissance micro-ondes (kW).

II.5. Etude phénoménologique des poudres obtenues

Les analyses physico-chimiques, le dosage des chlorophylles, la détermination de la teneur en eau ont été réalisées au sein du laboratoire BBBS de l'université de Bejaia.

II.5.1. Détermination de la teneur en eau

La méthode utilisée est connue sur le nom de « dessiccation par évaporation » ou méthode gravimétrique ou pondérale (**Schulze, Hubbermann, & Schwarz, 2014**). La teneur en eau est déterminée sur vingt six échantillons (douze échantillons de poudres de cosses de petits pois douze échantillons de poudres de cosses de fèves et deux échantillons frais) dont chacun d'eux contient 1 g de poudre à l'exception de l'échantillon frais qui contient 5 g de matière végétale fraîche, portées à la températures de $105^\circ C$ pendant 4 heures dans une étuve ventilée jusqu'à un poids constant. La teneur en eau est définie comme étant la perte de poids

subit lors de la dessiccation. Le taux d'humidité est calculé selon l'équation (6)(Doymaz, 2004):

$$H\% = \frac{M_1 - M_2}{M_0} \times 100 \dots\dots\dots (6)$$

H(%) : Taux d'humidité.

M1(g) : Masse de la boîte pétrie + l'échantillon avant séchage à l'étuve.

M2 (g) : Masse de la boîte pétrie + l'échantillon après séchage à l'étuve.

M0 (g) : Masse de la prise d'essai.

II.5.2. Propriétés fonctionnelles

Les propriétés fonctionnelles mesurées comprenaient le gonflement, la capacité de rétention d'eau et la capacité de rétention d'huile, basées sur les méthodes décrites par (Gouw, Jung, & Zhao, 2017) Comme suite :

II.5.2.1. Capacité de gonflement

Cent milligrammes d'échantillon a été hydraté dans un tube graduée contenant 10 ml d'eau distillée à la température ambiante. Au bout de 18 h, le volume (ml) occupé a été enregistré et la capacité de gonflement a été exprimée en volume (ml/g) d'échantillon d'origine (Gouw, Jung, & Zhao, 2017)

II.5.2.2. Capacité de rétention d'eau

Cinq cent milligrammes d'échantillon ont été hydraté dans 30 ml d'eau distillée dans un tube à centrifuge à la température ambiante. Au bout de 24 h, les échantillons ont été centrifugés à (5000 tours/min pendant 30min). Le surnageant a été décanté et le poids résidu a été enregistré. La capacité de rétention d'eau a été calculée comme la quantité d'eau retenue par le culot (g d'eau/ g d'échantillon poids sec) (Gouw, Jung, & Zhao, 2017).

II.5.2.3. Capacité de rétention d'huile

Le même protocole que ci-dessus a été suivi, en substituant eau distillée par huile d'olive extra vierge (acidité de 0.7°). La capacité de rétention d'huile a été exprimé en g d'huile/ g d'échantillon pois sec (Gouw, Jung, & Zhao, 2017).

II.5.3. Indice de brunissement

L'estimation de la réaction de Maillard et de l'intensité de brunissement a été réalisée à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Vis (1800). L'absorbance à 294 nm (A_{294}) est un indicateur des produits intermédiaires de la réaction de Maillard, tandis que l'absorbance à 420 nm (A_{420}) estime la teneur en produits finaux.

Une solution de 1.6 mg/ml dans de l'eau distillée a été préparée à partir de chaque échantillon. Les solutions ont été centrifugées à 6500 T pendant 5 min. Les surnageants finaux ont été utilisés pour recueillir les absorbances contre l'eau distillée comme blanc. (Tu et al., 2015).

II.5.4. Extraction et dosage de la chlorophylle

Les échantillons pesés ont été mis séparément dans 50 ml d'éther diéthylique à 95 %, de méthanol à 96% et d'acétone 100 % (50 ml pour chaque gramme), ont été homogénéisés. Le mélange a été filtré avec du papier filtre (standard plat) et centrifugé en utilisant la centrifugeuse (BEIJING ERA BEILI CENTRIFUGE CO, LTD) à 2500 tr/min pendant 10 minutes. Le surnageant a été récupéré et les absorbances ont été lues à 400-700 nm sur le spectrophotomètre (SHIMADZU UV-1800, Japon). Il a été enregistré que la chlorophylle a montré l'absorbance maximale à 662 nm, chlorophylle b à 646 nm et carotène total à 470 nm et la quantité de ces pigments a été calculée à partir des formules suivantes (LICHTENTHALER & Wellburn, 1983) :

$$C_a = 15.65A_{662} - 7.340A_{646} \dots \dots \dots (7)$$

$$C_b = 27.05A_{646} - 11.21A_{662} \dots \dots \dots (8)$$

Soit :

C_a : Quantité de la chlorophylle A.

C_b : Quantité de la chlorophylle B.

A_{662} : Absorbance à 662 nm.

A_{646} : Absorbance à 646 nm.

Introduction

Synthèse bibliographique

Matériel et méthodes

Résultats et discussions

Conclusion

Références bibliographiques

Annexes

III. Résultats et discussions

III.1. Cinétique de séchage des cosses de petit pois et de fève

L'évolution des teneurs en eau réduites des sous-produits de la fève et de petits pois en fonction du temps de séchage est présentée à la figure 4.

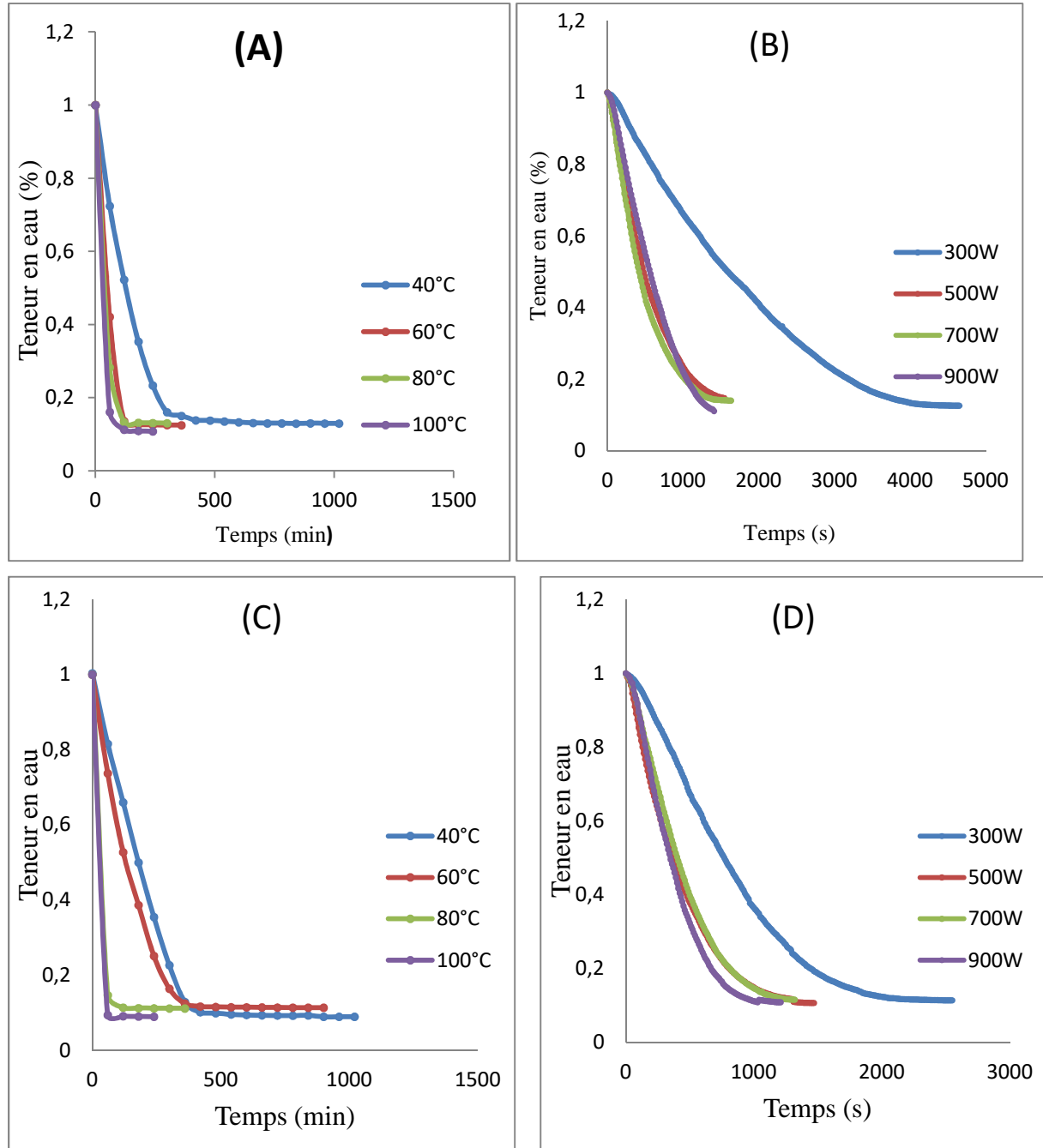


Figure 4 : Evolution de la teneur en eau réduite des gousses de petit pois séchées à l'étuve ventilée (A) et à la micro-onde (B), et des gousses de la fève séchées à l'étuve ventilée (C) et à la micro-onde (D) en fonction du temps.

Les courbes de teneurs en eau réduites en fonction du temps de séchage des deux sous-produits ont les mêmes allures. Elles ont une forme exponentielle décroissante. La vitesse de la perte en eau est plus élevée dans le début du processus et se réduit progressivement jusqu'à la fin de la procédure de séchage. La stabilité du poids peut être expliquée par le fait que la température de la matrice 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 plus d'eau libre dans le produit, donc l'humidité de la matrice est en équilibre avec l'humidité de l'air de séchage, ce qui signifie que le séchage est achevé (**Bonazzi and Bimbenet, 2003**).

L'analyse de la figure, montre que le temps de séchage à l'étuve est inversement proportionnel à la température appliquée. Les durées de séchage à l'étuve ventilée de la cosse de petit pois sont de 1020 min, 360 min, 340 min, 300 min pour les températures 40°C, 60°C, 80°C et 100°C respectivement, et les durées de séchage des gousses de la fève sont de 1020 min, 900 min, 360 min, 240 min pour les températures 40°C, 60°C, 80°C et 100°C respectivement. En effet, l'augmentation respective de la température de 40°C à 100°C entraîne une réduction respective du temps de séchage de 70.58% pour les cosses de petits pois et 76.47% pour les gousses de la fève.

L'augmentation de température a une influence sur le processus de séchage, cette augmentation réduit le temps de séchage et favorise l'élimination partielle de l'eau, ces résultats sont similaires à ceux rapportés dans la littérature (**BONAZZI & BIMBENET, 2003; Correia, Loro, Zanatta, Spoto, & Vieira, 2015; VASSEUR, 2009**), qui ont révélé que le temps de séchage est inversement proportionnel à la température appliquée.

La durée de séchage des sous-produits de petit pois à l'étuve ventilée est plus courte que la durée de séchage des sous-produits de la fève et cela peut s'expliquer par l'épaisseur de la gousse de la fève qui est de 0.3 cm par rapport à celle de petit pois qui est de 0.2 cm, ainsi que sa teneur en eau initiale qui est plus élevée (90%) par rapport à celle de petit pois (87.6%).

Le temps de séchage assisté par microonde des deux sous-produits est en fonction de la puissance de traitement. En effet, la durée de séchage de petit pois est de 77.5 min, 25.75 min, 27.25 min et 23.5 min pour les puissances 300W, 500W, 700W et 900W respectivement, et les durées de séchage assisté par microonde des gousses de la fève sont de 42.5 min, 24.5 min, 22 min et 20.16 min pour les puissances 300W, 500W, 700W et 900W respectivement, ces résultats montrent que l'augmentation de la puissance de sortie

des micro-ondes augmente considérablement le taux de séchage et donc diminution du temps de séchage. Ceci indique que le transfert de masse dans l'échantillon est plus rapide lors d'un chauffage à puissance élevée qui génère plus de chaleur au sein de l'échantillon ce qui crée une grande pression à l'intérieur du produit due au chauffage volumétrique (Wang, Zhang, & Mujumdar, 2014).

D'après les résultats obtenus le séchage assisté par microonde dessous-produits de la fève est plus rapide que celui dessous-produits de petit pois et cela peut s'expliquer par la présence d'un mince film solide qui couvre la cosse de petit pois dit « parchemin » ce dernier empêche la sortie d'eau.

La comparaison entre les deux méthodes de séchage appliqués, conventionnel et microonde, a montré que l'utilisation de la micro-onde réduit considérablement le temps de séchage.

Le transfert de chaleur sous chauffage micro-ondes est complètement inversé par rapport au chauffage conventionnel. Le transfert de chaleur classique se transmet de l'extérieur vers l'intérieur du produit. Sous chauffage aux micro-ondes, le volume traité devient lui-même source de chaleur. On parle de dégagement de la chaleur de l'intérieur vers l'extérieur (ANIZON, LEMAIRE, & SURBLED, 2003; Kharisov, Kharissova, & Méndez, 2012; ROUSSY, ROCHAS, & OBERLIN, 2003).

Le temps de séchage plus court dans micro-onde peut être expliqué par une haute pression interne et les gradients de concentration qui augmentent l'évaporation de liquide à travers le produit jusqu'à la stabilité (Chavan & Chavan, 2010).

L'efficacité de séchage par micro-onde a été expliquée de la même manière par (Mikulás, Sain, & Simon, 1992) sous l'effet de la puissance micro-onde l'eau est chauffée dans la masse de produit ce qui provoque des îlots de surpression, ces derniers vont migrer du cœur vers l'extérieur de produit en emmenant une stabilité du poids.

III.2. Consommation d'énergie

Le séchage des produits agricoles et alimentaires nécessite des quantités considérables d'énergie. Le coût élevé de l'énergie incite fortement à inventer des procédés qui vont utiliser l'énergie avec efficacité. Les résultats de la consommation de l'énergie dans les différentes conditions de séchage sont illustrés dans le tableau ci-après :

Tableau 2 : Consommation d'énergie des sous-produits de fève et de petit pois.

Conditions de séchage		Consommation d'énergie (KWh)	
		Gousse de la fève	Cosse de petit pois
Etuve	40°C	6,77894203	6,77894203
	60°C	6,36343568	2,86354606
	80°C	3,03545337	2,02363558
	100°C	1,90065818	0,871135
Micro-onde	300W	0,16166667	0,25833333
	500W	0,14722222	0,25833333
	700W	0,12333333	0,18222222
	900W	0,14805556	0,19652778

Les résultats de la consommation de l'énergie par l'étuve ventilée montrent que l'augmentation de la température de 40°C à 100°C conduit à une diminution de la consommation de l'énergie de 7 fois (6.778 KWh à 0.871 KWh) pour le séchage des gousses de petit pois et une diminution de 3 fois (6.778 KWh à 1.90 KWh) pour le séchage des gousses de la fève.

En revanche la puissance microonde influence légèrement la consommation d'énergie. Les plus faibles consommations d'énergie ont été enregistrées dans le séchage microonde 0,123KWh à 700W pour le séchage de la gousse de la fève et 0,182KWh toujours à 700W pour le séchage de la cosse de petit pois.

Les résultats montrent que le séchage assisté par micro-ondes réduit considérablement la consommation d'énergie par rapport au séchage conventionnel. En effet, le séchage de la gousse de petit pois à l'étuve ventilée 40°C consomme 6.778 KWh et le séchage de la même matrice à 700W micro-onde ne consomme que 0,12KWh.

Dans le cas de séchage micro-ondes l'énergie pénètre dans l'échantillon et produit de la chaleur par la polarité des molécules d'eau améliorant ainsi la vitesse de séchage et l'uniformité de la distribution de chaleur dans l'échantillon. Par conséquent, le temps de séchage et la consommation d'énergie ont été réduits (Alibas, 2007).

III.3. Les propriétés fonctionnelles

Les fibres alimentaires font partie des nutriments à enjeu de notre alimentation moderne, d'une part en raison de la carence en fibres observée dans la population, et d'autre part parce que l'on connaît aujourd'hui les bénéfices des fibres sur notre santé. Mais ces fibres sont aussi intéressantes pour les propriétés fonctionnelles qu'elles déploient selon les applications. Grâce à leur capacité à s'hydrater ou à retenir l'eau, les fibres végétales ont un pouvoir liant ou texturant qui permet d'améliorer un grand nombre de produits finis.

III. 3.1. Capacité de gonflement

La capacité de gonflement des cosses de petit pois et de fève séchées dans différentes conditions a été mesurée et les résultats sont présentés dans la figure 5.

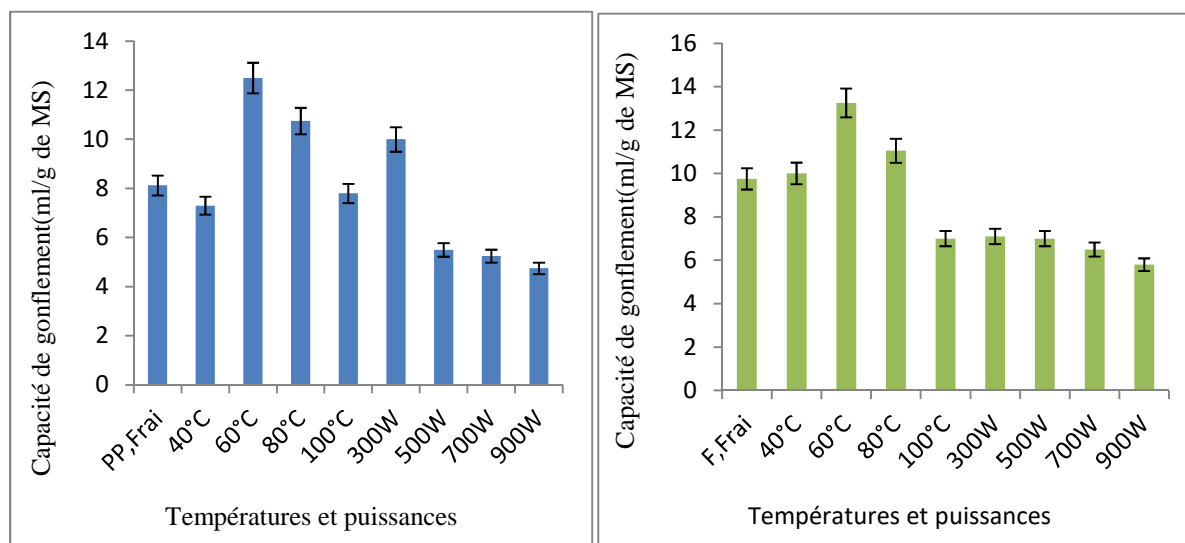


Figure 5: Effet de différentes conditions du séchage sur la capacité de gonflement des sous-produits de la fève et de petit pois.

Les résultats de la capacité de gonflement sont supérieurs aux résultats de l'échantillon frais pour toutes les températures de séchage étuve ventilée. Les meilleurs résultats sont enregistrés à 60°C pour les deux sous-produits de la fève et de petit pois 13.25 ± 0.035 ml/g de MS et 12.5 ± 0.00 ml/g de MS respectivement, et les plus basses sont enregistrées à 40°C et à 100°C et cela est probablement dû à la destruction de la structure cellulaire lors du séchage.

à long terme et a des températures élevées (Guillon & Champ, 2000). Les températures élevées entraînent des modifications structurelles dans les produits finis, ces changements structurels affectent les caractéristiques de collage des granules de glucides. De plus, les températures élevées provoquent la dénaturation des protéines.

Pour les poudres obtenues par le séchage assisté par microonde les meilleurs résultats de la capacité de gonflement pour les deux sous produits sont enregistrés à des bas niveaux de puissance microonde 300W (10 ± 0.282 ml/g de MS) et 500W (7 ± 0.5 ml/g de MS), et les plus basses capacités sont enregistrées à des niveaux élevés de puissance microonde 700W (6.5 ± 2 ml/g de MS) et a 900W (5.8 ± 0.3 ml/g de MS), et cela est probablement dû à la destruction de la structure cellulaire par la pression des microondes.

D'après les résultats obtenues, la capacité de gonflement de la gousse de fève (9.75 ± 0.50 ml/g de MS) est un peu supérieure à celle de la cosse de petit pois (8.125 ± 0.070 ml/g de MS), ces résultats sont similaires à ceux obtenus par (Mateos-Aparicio, Redondo-Cuenca, & Villanueva-Suárez, 2010)

III.3.2. Capacité de rétention d'eau

La capacité de rétention d'eau des cosses de petit pois et de la fève séchées à différentes conditions a été mesurée et les résultats sont illustrés dans la figure 6.

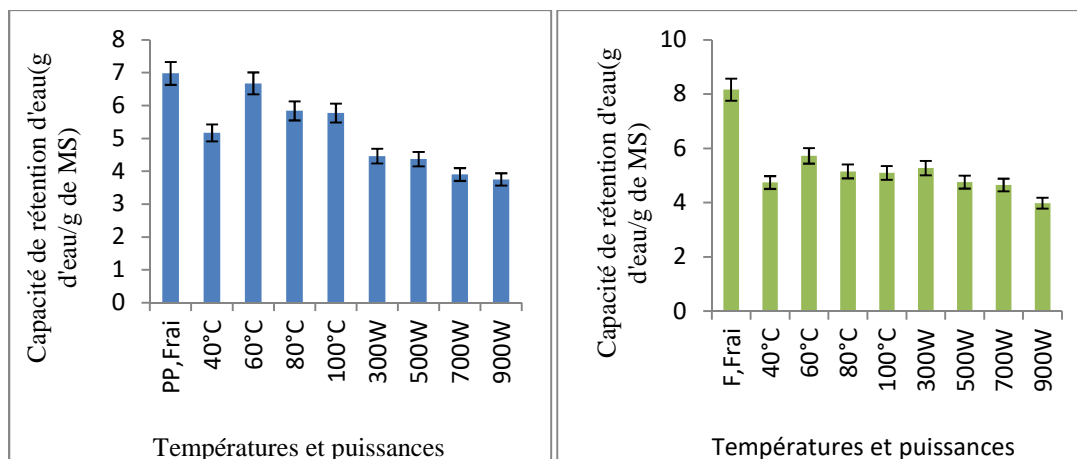


Figure 6 : Effet des différentes conditions de séchage sur la capacité de rétention d'eau des sous-produits de la fève et de petit pois.

Les résultats de la capacité de rétention d'eau sont inférieure aux résultats de l'échantillon frais pour toute les températures de séchage étuve ventilée, pour la gousse des fèves la capacité de rétention d'eau varient de 4.74 ± 0.162 à 5.72 ± 0.034 ml/g de MS pour une température qui varie de 40 à 100°C. Pour la cosse de petit pois la capacité de rétention d'eau varient de 5.16 ± 0.536 à 6.67 ± 1.239 ml/g de MS pour une température qui varie de 40 à 100°C. Les meilleurs résultats sont enregistrés a 60°C pour la fève (5.72 ± 0.034 ml/g de MS) et le petit pois (6.67 ± 1.239 ml/g de MS), et les plus basse sont enregistrés à 40°C (4.74 ± 0.162 ml/g de MS) pour la fève et (5.16 ± 0.536 ml/g de MS) pour le petit pois. Cela est probablement dû à la destruction de la structure cellulaire lors du séchage à long terme et a des températures élevées (**Guillon & Champ, 2000**).

Pour les poudres obtenues par le séchage assisté par microonde les meilleurs résultats de la capacité de rétention d'eau pour les deux sous produits sont enregistrés à des bas niveaux de puissance microonde 300W et les plus bas sont enregistrées à des niveaux élevés de puissance microonde 700W, et cela est probablement dû à la destruction de la structure cellulaire par la pression produite a l'intérieur des cellule lors de séchage a des niveaux élevés de puissance microondes ce qui provoque des changement dans les phénomènes osmotiques (**Kaymak-Ertekin, 2002**).

D'après les résultats obtenues, la capacité de rétention d'eau de la gousse de fève (8.16 ± 0.50 ml/g de MS) est supérieure a celle de la cosse de petit pois (6.97 ± 0.388 ml/g de MS), ces résultats sont proches de ceux de (**Mateos-Aparicio, Redondo-Cuenca, & Villanueva-Suárez, 2010**).

Vu les valeurs élevées de la capacité de gonflement et de la capacité de rétention d'eau, les sous-produits de la fève et de petit pois pourrait être utilisé comme ingrédient fonctionnel et comme agent de texture pour les aliments préparés dans l'industrie alimentaire.

III.3.3.Capacité de rétention d'huile

La capacité de rétention d'huile des cosse de petit pois et de la fève séchées sous différentes conditions a été mesurée et les résultats correspondants sont présentés dans la figure ci après.

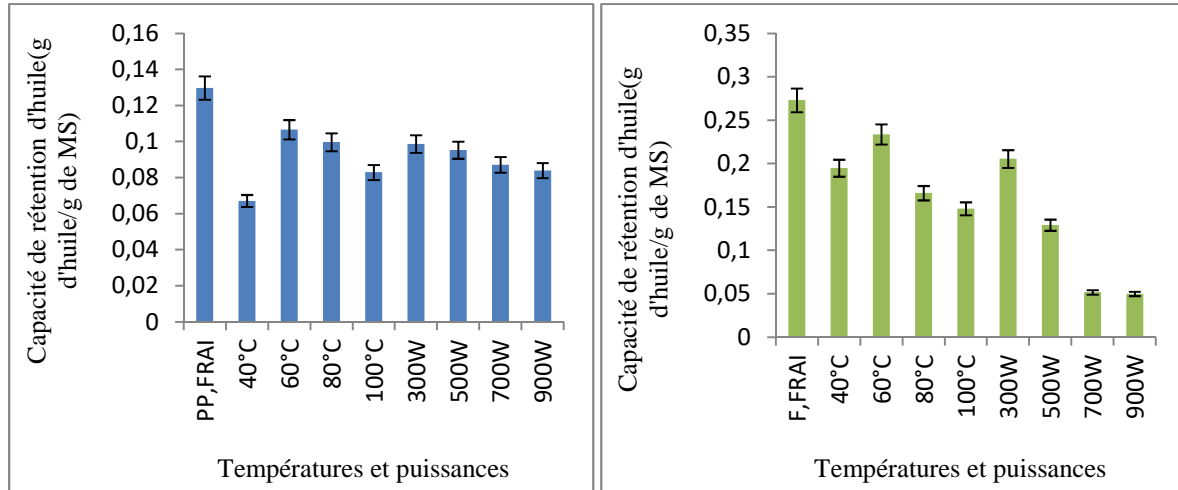


Figure 7 : Effet de différentes conditions du séchage sur la capacité de rétention d'huile des sous produits de fève et de petit pois.

Pour toutes les températures de séchage étuve ventilée les résultats de la capacité de rétention d'huile sont inférieurs aux résultats de l'échantillon frais. Les meilleurs résultats sont enregistrés à 60°C pour la fève (0.233 ± 0.204 ml/g de MS) et pour le petit pois (0.106 ± 0.009 ml/g de MS), et les plus bas sont enregistrés à 40°C (0.194 ± 0.098 ml/g de MS) ; (0.067 ± 0.009 ml/g de MS). Les meilleurs résultats de la capacité de rétention d'huile pour les deux sous produits séchés aux micro-ondes sont enregistrés à des bas niveaux de puissance microonde 300W, et les plus bas sont enregistrés à des niveaux élevés de puissance microonde.

La capacité de rétention d'huile est influencée par la nature lipophile à la surface et à l'intérieur des granules. Le séchage à des températures élevées et à des niveaux de puissance micro-ondes élevés peut induire une réduction de l'exposition plus des groupes lipophiles de la surface des granules de l'échantillon, ce qui entraîne une diminution de la capacité de rétention d'huile (Yang, 2019).

III.4. Indice de brunissement

L'intensité de brunissement et la progression de la réaction de Maillard ont été estimées à l'aide de la mesure de l'absorbance à 294nm et à 420 nm et les résultats sont illustrés dans le Tableau 3. Les produits de réaction de Maillard sont des polymères bruns qui absorbent à 420 nm et les produits intermédiaires de réaction de Maillard sont incolores et absorbent à 294.

Tableau 3 : intensité de brunissement des sous produits de fève et de petit pois pour les deux méthodes de séchage (étuve/microonde).

Conditions de séchage		Intensité de brunissement			
		Gousse de fève		Gousse de petit pois	
		Absorbance à 294nm	Absorbance à 420nm	Absorbance à 294nm	Absorbance à 420nm
Etuve	40°C	0,762	0,3645	0,609	0,3665
	60°C	0,3485	0,1425	0,4985	0,156
	80°C	0,464	0,211	0,364	0,168
	100°C	0,625	0,2685	0,468	0,1385
Microonde	300W	0,7535	0,2215	0,831	0,1615
	500W	0,776	0,2555	0,658	0,1275
	700W	0,7825	0,2625	1,421	0,5435
	900W	1,2095	0,289	1,093	0,225

Pour le séchage à l'étuve ventilée la plus forte absorbance aux deux longueurs d'onde a été enregistrée à la température 40°C pour les deux sous produits, en effet à 294 nm l'absorbance est de 0.762 nm pour la gousse de fève et 0.609 nm pour la cosse de petit pois, et à 420 nm l'absorbance est de 0.3645 nm pour la gousse de fève et 0.3655 nm pour la cosse de petit pois, et cela peut s'expliquer par le temps de séchage qui est long à faible température même si à ces température la réaction est lente.

Pour le séchage assisté par la microonde la plus forte absorbance aux deux longueurs d'onde a été enregistrée à des niveaux de puissances élevées pour les deux sous produits : a 294 nm l'absorbance est de 1.2095 nm pour la gousse de fève et 1.093 nm pour la cosse de

petit pois, a 420 nm l'absorbance est de 0.289 nm pour la gousse de fève et de 0.225 nm pour la cosse de petit pois, ce qui signifie que plus la puissance augmente, plus la vitesse de la réaction est importante.

Les résultats montrent que le séchage à la microonde intensifie le brunissement par rapport au séchage à l'étuve ventilée et ce résultat est en contradiction avec ceux trouvés par les chercheurs (Feng & Tang, 1998; Krokida & Maroulis, 1999; Maskan, 2000; Musa Özcan, Arslan, & Gökçalik, 2007), qui ont trouvé que le séchage à l'air chaud intensifie le brunissement par rapport au séchage au MO pour le séchage de quelques produits, romarin, pommes en cubes, bananes respectivement. Ces résultats peuvent s'expliquer par la formation de nouveaux produits bruns lors de traitement micro-onde.

La nature de l'aliment, en particulier sa teneur et la nature des sucres ainsi que sa teneur en eau initiale, peut expliquer également cette différence de résultats.

III.5.Extraction et dosage de la chlorophylle

Les chlorophylles, colorants responsables de la caractéristique de la couleur verte des fruits et légumes, sont fortement sensibles à la dégradation pendant le traitement, ayant pour résultat la modification de la couleur des aliments (S. J. Schwartz, Von Elbe, Pariza, Goldsworthy, & Pitot, 1983). La conservation de la chlorophylle a été employée comme mesure de qualité dans les légumes verts (Sweeney & Martin, 1961). Les résultats de dosage de la chlorophylle a et b sont illustrés dans la figure suivante :

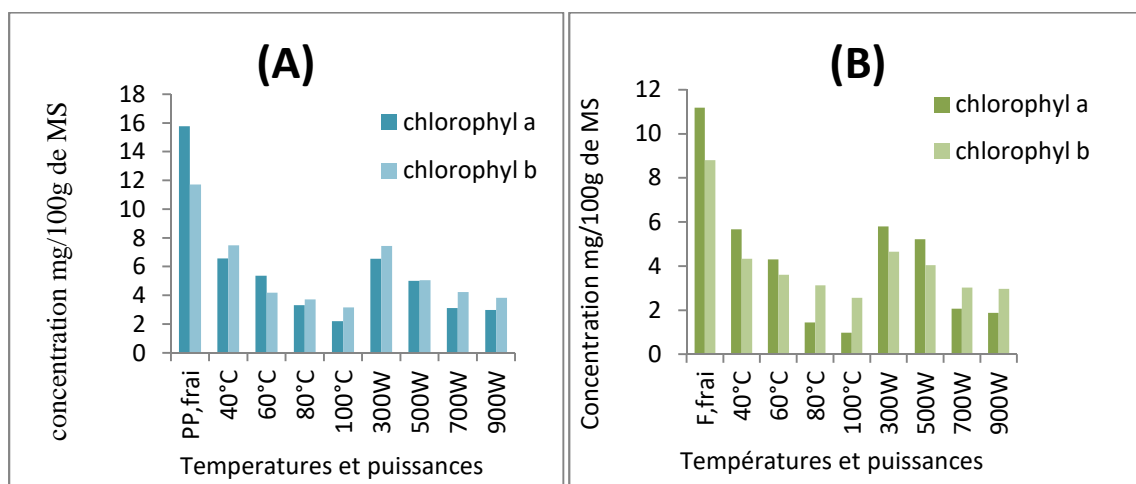


Figure 8 : Teneur en chlorophylle « a » et « b » pour les sous produits de petit pois (A) et de fève (B) à différentes températures et puissances.

Les résultats ont montrés que la teneur en chlorophylle « a » est supérieur a la teneur en chlorophylle « b » pour les échantillons frais des deux sous-produits. La teneur en chlorophylle « a » est de 15.762 mg/100 g de MS pour les petit pois et de 11.183 mg /100 g de MS pour les fèves, la teneur en chlorophylle « b » est de 11.716 mg/ 100g de MS pour le petit pois et 8.802 mg/100 g de MS pour les fèves.Ces résultats étaient inférieurs à ceux obtenus par **(Belghith-Fendri, Chaari, Kallel, Zouari-Ellouzi, Ghorbel, Besbes, et al., 2016)** et cela est peut être du aux conditions climatique, l'état de maturation et a la variété.

La teneur en chlorophylle « a » et « b » diminue après séchage par les deux méthodes (étuve et micro-onde) par apport à l'état frais.A l'étuve la meilleure concentration de la chlorophylle « a » et « b » pour les deux sous produits de fève et de petit pois est enregistrée à 40°C et au microonde la concentration la plus élevée de la chlorophylle « a » et « b » pour les deux sous produits de fève et de petit pois est enregistré à la plus basse puissance 300W.

Les colorants responsables de la couleur verte caractéristique des fruits et légumes, sont fortement susceptibles à la dégradation pendant le traitement thermique(**Koca, Karadeniz, & Burdurlu, 2007**). Il est bien connu que le chauffage excessif des produits alimentaires cause des pertes considérables en chlorophylle (**S. Schwartz & Lorenzo, 1991**).

La chlorophylle « a » est plus sensible au traitement thermique par rapport a la chlorophylle « b ».Selon (**HAYAKAWA & TIMBERS, 1977**), la chlorophylle 'a' est thermiquement moins stable que la chlorophylle 'b'.

Conclusion

Parmi toutes les méthodes de conservation des aliments, le séchage reste une opération avantageuse en raison de la durée de conservation longue, de la facilité de stockage à température ambiante et de la réduction de la masse de denrée alimentaire séchée.

Dans cette présente investigation, un suivi des cinétiques du séchage assisté par microondes et par étuve ventilée des sous produits de la fève et de petit pois a été réalisé. Ensuite, la consommation de l'énergie par les deux méthodes de séchage a été calculée. Enfin, l'effet de séchage sur les propriétés fonctionnelles, la teneur en chlorophylle et l'indice de brunissement a été évalué.

Les résultats obtenus ont révélé que la cinétique de l'eau pour les différentes puissances microondes (300W, 500W, 700W et 900W) et les différentes températures étuve (40°C, 60°C, 80°C et 100°C) a eu une allure exponentielle décroissante.

La comparaison entre les deux méthodes de séchage a révélée que l'utilisation de microonde réduit considérablement le temps de séchage et la consommation d'énergie. En effet, cette réduction est plus de 50 fois par rapport aux temps de séchage à l'étuve ventilée, et plus de 42 fois par rapport à la consommation de l'énergie par l'étuve ventilée.

Les meilleurs résultats des trois propriétés fonctionnelles (capacité de gonflement, capacité de rétention d'eau, capacité de rétention d'huile) pour les deux sous produits sont enregistrés à la température 60°C, et cela est probablement dû à la destruction de la structure cellulaire par la pression produite à l'intérieur des cellule lors de séchage assisté par microondes et par le temps et la température élevé lors du séchage à l'étuve.

Le séchage assisté par micro-onde préserve mieux la couleur par rapport à l'étuve. En effet, les plus basses teneuses en chlorophylle « a » et « b » des deux sous produits sont enregistrées à des températures élevées de l'étuve.

L'estimation de l'intensité de brunissement et de la progression de la réaction de Maillard montre que le séchage à la microonde intensifie le brunissement par rapport au séchage à l'étuve ventilée et cela pourrait être dû à la formation de nouveaux composés lors du traitement thermique.

A

- Abdelkader, F. Z., & Ouadah, A. 2016.** Etude de l'activité insecticide des extraits hydro-alcoliques de *Ricinus communis* L. et *Sapindus saponaria* L. sur le puceron noire de fève «*Aphis fabae*».
- Akpinar, E. K. 2006.** Mathematical modelling of thin layer drying process under open sun of some aromatic plants. *Journal of Food Engineering*, 77(4): 864-870.
- Alibas, I. (2007).** "Microwave, air and combined microwave–air-drying parameters of pumpkin slices." *LWT-food science and technology* 40(8): 1445-1451.
- ALLAF, K., MOUNIR, S., & ALLAF, T. (2012).** Swell-drying: séchage et texturation par DIC des végétaux.
- Anthony, F., Combes, M., Astorga, C., Bertrand, B., Graziosi, G., & Lashermes, P. 2002.** The origin of cultivated *Coffea arabica* L. varieties revealed by AFLP and SSR markers. *Theoretical and Applied Genetics*, 104(5): 894-900.
- Arnsperger, C., & Bourg, D. 2016.** Vers une économie authentiquement circulaire. *Revue de l'OFCE*(1): 91-125.

B

- Belghith-Fendri, L., F. Chaari, et al. (2016).** "Pea and broad bean pods as a natural source of dietary fiber: the impact on texture and sensory properties of cake." *Journal of food science* 81(10): C2360-C2366.
- Belit, A., Haddar, S., & Taib, N. 2016.** *Etude Et Programmation D'une Nouvelle Ligne De Séchage De Sucre Avec Un API S7-300*. Université abderrahmane mira béjaia.
- Bimbenet, J.-J. 1978.** *Le séchage dans les industries agricoles et alimentaires*: SEPAIC.
- BONAZZI, C., & BIMBENET, J.-J. 2003.** Séchage des produits alimentaires Principes. *Techniques de l'ingénieur. Agroalimentaire*, 2(F3000): F3000. 3001-F3000. 3014.
- Bonazzi, C., & Bimbenet, J.-J. 2008.** Séchage des produits alimentaires: Appareils et applications. *Techniques de l'ingénieur. Agroalimentaire*, 2(F3002).
- Bonazzi, C., Dumoulin, E., & Bimbenet, J. 2008.** Le séchage des produits alimentaires. *Industrie Alimentaire Agricole*, 125(03-04): 12-22.
- Bougoufa, S., Guendouzi, N., & Hamitou, M. 2018.** Inventaire des maladies fongiques des plantes légumineuses.

Bravo, L., & Saura-Calixto, F. 1998. Characterization of dietary fiber and the in vitro indigestible fraction of grape pomace. *American Journal of Enology and Viticulture*, 49(2): 135-141.

Brink, M., Belay, G., & De Wet, J. 2006. *Plant resources of tropical Africa 1: Cereals and pulses*: PROTA Foundation Wageningen, The Netherlands.

C

Chakraverty, A., Mujumdar, A. S., & Ramaswamy, H. S. 2003. *Handbook of postharvest technology: cereals, fruits, vegetables, tea, and spices*: CRC Press.

Charmond, S. 2009. *Développement d'un four micro-ondes monomode et frittage de poudres céramique et métallique*. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.

Colacino, E., Nun, P., Colacino, F. M., Martinez, J., & Lamaty, F. 2008. Solvent-free synthesis of nitrones in a ball-mill. *Tetrahedron*, 64(23): 5569-5576.

Correia, A., A. Loro, et al. (2015). "Effect of temperature, time, and material thickness on the dehydration process of tomato." International journal of food science 2015.

D

Darvishi, H., Asl, A. R., Asghari, A., Azadbakht, M., Najafi, G., & Khodaei, J. 2014. Study of the drying kinetics of pepper. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 13(2): 130-138.

Doymaz, I. 2004. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*, 61(3): 359-364.

Duc, G., Mignolet, C., Carrouée, B., & Huyghe, C. 2010. Importance économique passée et présente des légumineuses: Rôle historique dans les assolements et les facteurs d'évolution. *Innovations agronomiques*, 11: 1-24.

Dudez, P., Thémelin, A., & Reynes, M. 1996. *Le séchage solaire à petite échelle des fruits et légumes: expériences et procédés*: Édition du Gret.

F

Fao, F. 2008. Food and agriculture organisation of the United Nations. Retrieved on, 15.

FAO. (2013). *FAO Statistical Yearbook: World Food and Agriculture*: FAO.

Fendri, L. B., F. Chaari, et al. (2016). "Wheat bread enrichment by pea and broad bean pods fibers: effect on dough rheology and bread quality." LWT 73: 584-591.

Feng, H. and J. Tang (1998). "Microwave finish drying of diced apples in a spouted bed." Journal of food science **63**(4): 679-683.

G

Galanakis, C. M. (2012). Recovery of high added-value components from food wastes: conventional, emerging technologies and commercialized applications. *Trends in Food Science & Technology*, *26*(2), 68-87.

Gouw, V. P., J. Jung, et al. (2017). "Functional properties, bioactive compounds, and in vitro gastrointestinal digestion study of dried fruit pomace powders as functional food ingredients." LWT **80**: 136-144.

Gowen, A., Abu-Ghannam, N., Frias, J., & Oliveira, J. 2008. Modeling dehydration and rehydration of cooked soybeans subjected to combined microwave-hot-air drying. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *9*(1): 129-137.

Grigelmo-Miguel, N., Gorinstein, S., & Martín-Belloso, O. (1999). Characterisation of peach dietary fibre concentrate as a food ingredient. *Food Chemistry*, *65*(2), 175-181.

Guillon, F. and M. Champ (2000). "Structural and physical properties of dietary fibres, and consequences of processing on human physiology." Food research international **33**(3-4): 233-245.

H

HAYAKAWA, K. I. and G. E. TIMBERS (1977). "Influence of heat treatment on the quality of vegetables: changes in visual green color." Journal of food science **42**(3): 778-781.

I

Igor, N. A. L., Clement, A. D., Kouakou, B., & Emmanuel, A. N. 2015. MODELISATION DE LA CINETIQUE DE SECHAGE DES FEVES DE CACAO PAR DES MODELES SEMI-EMPIRIQUES ET PAR UN RESEAU DE NEURONES ARTIFICIELS RECURRENT: CAS DU SECHAGE MICROONDE PAR INTERMITTENCE. *European Scientific Journal, ESJ*, *11*(9).

J

- Jain, T., Jain, V., Pandey, R., Vyas, A., & Shukla, S. 2009.** Microwave assisted extraction for phytoconstituents—an overview. *Asian Journal of Research in Chemistry*, 2(1): 19-25.
- Jayaraman, K., & Gupta, D. D. 2006.** Drying of fruits and vegetables, *Handbook of industrial drying*: 630-659: CRC Press.

K

- Kaymak-Ertekin, F. (2002).** "Drying and rehydrating kinetics of green and red peppers." *Journal of food science* **67**(1): 168-175.
- Kaymak-Ertekin, F. (2002).** "Drying and rehydrating kinetics of green and red peppers." *Journal of food science* **67**(1): 168-175.
- Kim, J.-S., & Lee, Y.-S. 2009.** Antioxidant activity of Maillard reaction products derived from aqueous glucose/glycine, diglycine, and triglycine model systems as a function of heating time. *Food Chemistry*, 116(1): 227-232.
- Koca, N., F. Karadeniz, et al. (2007).** "Effect of pH on chlorophyll degradation and colour loss in blanched green peas." *Food Chemistry* **100**(2): 609-615.
- Krokida, M. and Z. Maroulis (1999).** "Effect of microwave drying on some quality properties of dehydrated products." *Drying Technology* **17**(3): 449-466.

L

- Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahrouz, M., & Jaouhari, J. 2004.** Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). *Journal of Food Engineering*, 61(2): 173-179.
- Laufenberg, G., Kunz, B., & Nystroem, M. (2003).** Transformation of vegetable waste into value added products::(A) the upgrading concept;(B) practical implementations. *Bioresource technology*, 87(2), 167-198.
- Li, Z., Raghavan, G., & Orsat, V. 2010.** Temperature and power control in microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 97(4): 478-483.

LICHTENTHALER, H. K., & Wellburn, A. R. 1983. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents: Portland Press Limited.

M

Mafart, P. (1996). "Génie industriel alimentaire."

Maskan, M. (2000). "Microwave/air and microwave finish drying of banana." Journal of Food Engineering **44**(2): 71-78.

Mateos-Aparicio Cediél, I., Mateos-Peinado, C., Jiménez Escrig, A., & Rupérez Antón, P. 2008. Okara de soja y actividades antioxidantes de sus polisacáridos.

Mateos-Aparicio, I., A. Redondo-Cuenca, et al. (2010). "Isolation and characterisation of cell wall polysaccharides from legume by-products: Okara (soymilk residue), pea pod and broad bean pod." Food Chemistry **122**(1): 339-345.

Mateos-Aparicio, I., Redondo-Cuenca, A., & Villanueva-Suárez, M. J. 2012. Broad bean and pea by-products as sources of fibre-rich ingredients: potential antioxidant activity measured in vitro. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **92**(3): 697-703.

Mateos-Aparicio, I., Redondo-Cuenca, A., Villanueva-Suárez, M.-J., Zapata-Revilla, M.-A., & Tenorio-Sanz, M.-D. 2010. Pea pod, broad bean pod and okara, potential sources of functional compounds. *LWT-food science and technology*, **43**(9): 1467-1470.

Midilli, A., & Kucuk, H. 2003. Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. *Energy conversion and Management*, **44**(7): 1111-1122.

Mikulás, S., I. Sain, et al. (1992). "Complexity of equational theory of relational algebras with projection elements." Bulletin of the Section of Logic **21**(3): 103-111.

Mounir, S., Téllez-Pérez, C., Alonzo-Macías, M., & Allaf, K. 2014. Swell-Drying, *Instant Controlled Pressure Drop (DIC) in Food Processing*: 3-43: Springer.

Mujumdar, A. S., & Devahastin, S. 2000. Fundamental principles of drying. *Exergex, Brossard, Canada*, **1**(1): 1-22.

Musa Özcan, M., D. Arslan, et al. (2007). "Some compositional properties and mineral contents of carob (*Ceratonia siliqua*) fruit, flour and syrup." International Journal of Food Sciences and Nutrition **58**(8): 652-658.

O

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

R

Ratti, C. 2009. *Advances in Food Dehydration (Vol. 5): United States of America: Taylor & Francis Group.*

S

Scalbert, A., Manach, C., Morand, C., Rémésy, C., & Jiménez, L. 2005. Dietary polyphenols and the prevention of diseases. *Critical reviews in food science and nutrition*, 45(4): 287-306.

Schieber, A., Stintzing, F., & Carle, R. 2001. By-products of plant food processing as a source of functional compounds—recent developments. *Trends in Food Science & Technology*, 12(11): 401-413.

Schulze, B., Hubbermann, E. M., & Schwarz, K. 2014. Stability of quercetin derivatives in vacuum impregnated apple slices after drying (microwave vacuum drying, air drying, freeze drying) and storage. *LWT-food science and technology*, 57(1): 426-433.

Schwartz, S. and T. Lorenzo (1991). "Chlorophyll stability during continuous aseptic processing and storage." *Journal of food science* 56(4): 1059-1062.

Schwartz, S. J., J. Von Elbe, et al. (1983). "Inability of red beet betalain pigments to initiate or promote hepatocarcinogenesis." *Food and Chemical Toxicology* 21(5): 531-535.

Sumnu, G., Sahin, S., & Sevimli, M. (2005). Microwave, infrared and infrared-microwave combination baking of cakes. *Journal of Food Engineering*, 71(2), 150-155.

Sweeney, J. and M. Martin (1961). "Stability of chlorophyll in vegetables as affected by pH." *Food Technology* 15(5): 263-&.

T

Tiwari, B. K., Gowen, A., & McKenna, B. 2011. *Pulse foods: processing, quality and nutraceutical applications: Academic Press.*

Toğrul, İ. T., & Pehlivan, D. 2002. Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering*, 55(3): 209-216.

Tu, Z.-c., Hu, Y.-m., Wang, H., Huang, X.-q., Xia, S.-q., & Niu, P.-p. 2015. Microwave heating enhances antioxidant and emulsifying activities of ovalbumin glycated with glucose in solid-state. *Journal of food science and technology*, 52(3): 1453-1461.

U

VASSEUR, J. 2009. Séchage: principes et calcul d'appareils-Séchage convectif par air chaud (partie 1).

Vega-Gálvez, A., Di Scala, K., Rodríguez, K., Lemus-Mondaca, R., Miranda, M., López, J., & Perez-Won, M. 2009. Effect of air-drying temperature on physico-chemical properties, antioxidant capacity, colour and total phenolic content of red pepper (*Capsicum annuum*, L. var. Hungarian). *Food Chemistry*, 117(4): 647-653.

Visavale, G. 2012. Principles, classification and selection of solar dryers. *Solar drying: Fundamentals, Applications and Innovations. Singapore.*

W

Wadhwa, M., Kaushal, S., & Bakshi, M. 2006. Nutritive evaluation of vegetable wastes as complete feed for goat bucks. *Small Ruminant Research*, 64(3): 279-284.

Wang, E., & Martinez-Romero, E. 2000. *Sesbania herbacea*-*Rhizobium huautlense* nodulation in flooded soils and comparative characterization of *S. herbacea*-nodulating *Rhizobia* in different environments. *Microbial ecology*, 40(1): 25-32.

Y

Yaldiz, O., Ertekin, C., & Uzun, H. I. 2001. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*, 26(5): 457-465.

Yaldız, O., & Ertekýn, C. 2001. Thin layer solar drying of some vegetables. *Drying Technology*, 19(3-4): 583-597.

Yang, Y., Meng, H., & Tie, X. 2019. Interference cancelation feedback method, related apparatus, and system: Google Patents.

Z

Zogzas, N., Maroulis, Z., & Marinos-Kouris, D. 1994. Densities, shrinkage and porosity of some vegetables during air drying. *Drying Technology*, 12(7): 1653-1666.

teneur en eau réduite (%) pour les fèves (étuve)

temps (min)	40°C		60°C		80°C		100°C	
	moyenne	écart type	moyenne	écart type	moyenne	écart type	moyenne	écart type
0	1,00344	0,00573379	1,0002	7,2111E-05	1,00005	1E-05	1,00009333	3,0551E-05
60	0,81594	0,00928	0,73728	0,00389836	0,14665	0,01195	0,09369333	0,00031005
120	0,6598	0,00668718	0,52716667	0,02569973	0,11347	0,00083	0,09072667	0,00015011
180	0,49966667	0,01084274	0,38626	0,02038653	0,11207	0,00127	0,08964667	0,00022745
240	0,35452	0,00336309	0,25085333	0,01126001	0,11162	0,00138	0,08926	0,00034641
300	0,22636	0,00454352	0,16373333	0,00598907	0,11126	0,0014		
360	0,12842	0,02280852	0,12449333	0,00126623	0,1111	0,00144		
420	0,10122667	0,00160154	0,11646	0,00237647				
480	0,09875333	0,00181486	0,11526	0,00299005				
540	0,09536667	0,00160615	0,11451333	0,00299715				
600	0,09392	0,00161009	0,11434667	0,00298297				
660	0,09306667	0,00145029	0,11408	0,00308292				
720	0,09246667	0,00117172	0,11362667	0,00302895				
780	0,09206667	0,00109715	0,11345333	0,00313715				
840	0,09267333	0,00101692	0,11328	0,00308292				
900	0,08910667	0,0065186	0,11325333	0,00303726				
960	0,08904667	0,00648103						
1020	0,08904667	0,00648103						

teneur en eau réduite (%)pour les fèves (micro onde)

temps (s)	300W		500W		700W		900W	
	moyenne	écart type	moyenne	écart type	moyenne	écart type	moyenne	écart type
0								
10	0,997	0,001249	0,9902	0,01129425	0,99453333	0,00236925	1,00013333	0,00011547
20	0,99533333	0,00117189	0,98573333	0,01057607	0,9894	0,00502394	0,99273333	0,00500133
30	0,9926	0,00052915	0,9786	0,01011731	0,98313333	0,00635085	0,98713333	0,00484286
40	0,99046667	0,00161658	0,96766667	0,01239731	0,9748	0,00763151	0,97686667	0,0075295
50	0,98666667	0,00117189	0,95146667	0,01547169	0,96513333	0,00830502	0,97393333	0,0081617
60	0,98366667	0,0020232	0,93913333	0,01347937	0,955	0,00890169	0,95666667	0,00966713
70	0,97986667	0,00410041	0,91833333	0,01202054	0,94306667	0,0097823	0,94173333	0,0142609
80	0,97513333	0,00402161	0,90093333	0,01145833	0,9302	0,01160517	0,93086667	0,02396191
90	0,96966667	0,00508462	0,88346667	0,0100724	0,9176	0,01082959	0,91766667	0,02783547
100	0,96493333	0,00546382	0,86046667	0,00449592	0,89766667	0,01147229	0,89493333	0,0303238
110	0,95966667	0,00685371	0,84433333	0,00661614	0,88293333	0,01645519	0,87766667	0,03105629
120	0,95433333	0,0055003	0,8258	0,00550273	0,8678	0,0182	0,86526667	0,02967985
130	0,94826667	0,00646323	0,8088	0,0068352	0,85066667	0,02098793	0,84213333	0,03987698
140	0,94153333	0,00810021	0,79173333	0,0059911	0,8368	0,02027708	0,82706667	0,04058193
150	0,934	0,00864176	0,7756	0,00779487	0,82	0,01614559	0,8072	0,04554909
160	0,92753333	0,00810267	0,75966667	0,00732211	0,80986667	0,01680278	0,7874	0,05081063
170	0,92086667	0,008519	0,74413333	0,00940284	0,7972	0,01754879	0,77006667	0,05010562
180	0,9134	0,00696563	0,72853333	0,01004258	0,78433333	0,01868083	0,75493333	0,05045288
190	0,90713333	0,00825914	0,71306667	0,01258306	0,7712	0,02035976	0,7386	0,05418967
200	0,89966667	0,00808538	0,6978	0,01206151	0,7568	0,0229678	0,71653333	0,06208392
210	0,8922	0,00900666	0,68413333	0,01023784	0,74266667	0,02460596	0,69593333	0,07132807
220	0,8842	0,0095268	0,67093333	0,01182765	0,72966667	0,02542151	0,68153333	0,07164366
230	0,877	0,0078	0,66066667	0,01001266	0,717	0,02634616	0,6626	0,07279423
240	0,86946667	0,00723418	0,6474	0,0081265	0,703	0,02751363	0,6458	0,07914341
250	0,8638	0,00707672	0,63573333	0,0074467	0,68973333	0,02760024	0,6328	0,07923358
260	0,85806667	0,00786469	0,6242	0,00643739	0,67786667	0,02830995	0,61926667	0,07832377
270	0,84993333	0,00866333	0,61186667	0,00632877	0,6656	0,02921849	0,60553333	0,07910103
280	0,84513333	0,00480555	0,59853333	0,00972899	0,65013333	0,02922488	0,58953333	0,08258628
290	0,83733333	0,00541233	0,58493333	0,01226594	0,63446667	0,0278024	0,57553333	0,08280201
300	0,83053333	0,00502925	0,5738	0,01260476	0,62333333	0,02902298	0,56506667	0,08516721
310	0,82333333	0,00677151	0,56346667	0,01285198	0,61133333	0,03040548	0,55126667	0,08646533
320	0,81626667	0,00699238	0,5514	0,01456159	0,59906667	0,03005617	0,53806667	0,08692993
330	0,8074	0,00711899	0,54093333	0,01293883	0,58626667	0,03269883	0,5226	0,0901867
340	0,79933333	0,00832666	0,53026667	0,01305118	0,5748	0,03429694	0,51026667	0,08633663
350	0,7934	0,01044031	0,52006667	0,01273787	0,5622	0,03335446	0,49533333	0,08768588
360	0,78733333	0,01207366	0,50866667	0,01032537	0,54793333	0,03134347	0,4834	0,08587223
370	0,78206667	0,01383522	0,4996	0,01096722	0,53733333	0,03408597	0,47273333	0,08191736
380	0,77333333	0,01510143	0,48593333	0,01069081	0,52473333	0,03563949	0,45986667	0,0827184
390	0,7656	0,01617529	0,4774	0,00990152	0,5126	0,03748653	0,44686667	0,08045927
400	0,75713333	0,01670609	0,46953333	0,01045817	0,50213333	0,03665751	0,43253333	0,08519257
410	0,74953333	0,01496841	0,4614	0,01021372	0,49113333	0,03775359	0,4172	0,08236286
420	0,7432	0,01356908	0,45246667	0,01098423	0,48026667	0,03799175	0,40453333	0,08493535
430	0,7346	0,01455885	0,4438	0,01067146	0,46893333	0,03822791	0,39406667	0,08583923
440	0,72673333	0,01361372	0,43286667	0,01197553	0,45946667	0,03805277	0,382	0,08278067
450	0,7186	0,01249	0,4226	0,00927146	0,44806667	0,03827967	0,3694	0,08711119
460	0,71046667	0,01341989	0,41433333	0,01014364	0,43933333	0,03758209	0,35813333	0,08935778
470	0,70186667	0,01443514	0,40653333	0,0110351	0,42726667	0,03918384	0,3498	0,08904111
480	0,69033333	0,01201055	0,39786667	0,01100242	0,41753333	0,03691413	0,3412	0,08659169
490	0,6816	0,01220492	0,3912	0,01114989	0,40786667	0,03645125	0,33253333	0,08473165
500	0,6736	0,0088476	0,3816	0,01281718	0,39773333	0,03706067	0,32353333	0,08693937
510	0,66786667	0,0068712	0,3746	0,01312859	0,38946667	0,03666515	0,31366667	0,08890902
520	0,65753333	0,01149319	0,36746667	0,01228386	0,3816	0,03561292	0,30633333	0,08715626
530	0,65206667	0,01246167	0,36113333	0,01194878	0,3732	0,03580335	0,2972	0,08262905
540	0,64653333	0,01290633	0,35433333	0,01253688	0,365	0,03559831	0,28913333	0,08223438
550	0,64073333	0,0125289	0,34673333	0,01267491	0,35726667	0,03555634	0,2814	0,07954697
560	0,63526667	0,01258782	0,3402	0,01297998	0,34793333	0,03425337	0,27433333	0,0774582
570	0,62993333	0,01275827	0,33373333	0,01285976	0,341	0,03424091	0,266	0,07691268
580	0,62286667	0,01275983	0,32586667	0,01358578	0,33293333	0,03598463	0,25933333	0,07570583
590	0,61713333	0,01238117	0,3176	0,0167009	0,3256	0,03516077	0,2504	0,07778509
600	0,6072	0,01709854	0,3104	0,01839891	0,31733333	0,03494128	0,24306667	0,07381337
610	0,59766667	0,02001233	0,30446667	0,01858422	0,31113333	0,03284286	0,2358	0,07239254
620	0,5922	0,01951102	0,2988	0,01864189	0,3032	0,03194746	0,22806667	0,06940038
630	0,584	0,02182476	0,29206667	0,01983162	0,29746667	0,03206327	0,22326667	0,06821212
640	0,57873333	0,01911056	0,28593333	0,02066333	0,2914	0,03076882	0,2172	0,06632405
650	0,571	0,02020297	0,27913333	0,02107352	0,28333333	0,02982974	0,20906667	0,0613861
660	0,56566667	0,01851522	0,2716	0,02337263	0,27713333	0,02880995	0,2036	0,05959094
670	0,56113333	0,01650374	0,2666	0,02370823	0,271	0,02902482	0,19713333	0,05797459
680	0,55473333	0,01528441	0,26146667	0,0242663	0,26426667	0,02948242	0,1928	0,05595605
690	0,54953333	0,01402331	0,25486667	0,02454411	0,25726667	0,03132432	0,18806667	0,05399716
700	0,54493333	0,01290323	0,25046667	0,02498666	0,25106667	0,03224055	0,18366667	0,05273949
710	0,53673333	0,01086155	0,2454	0,02494233	0,24413333	0,0314034	0,18006667	0,05206163
720	0,53046667	0,01019085	0,24106667	0,02433626	0,2392	0,03139172	0,17626667	0,05029924

730	0,52353333	0,00979047	0,23626667	0,02531429	0,23486667	0,03201021	0,17286667	0,04910777
740	0,5176	0,00941701	0,23186667	0,02616435	0,23053333	0,03056883	0,1676	0,0460834
750	0,51113333	0,00884609	0,2262	0,02546606	0,22546667	0,02918927	0,1648	0,04451472
760	0,50553333	0,00820813	0,222	0,02526974	0,2212	0,02835983	0,15826667	0,04014789
770	0,49913333	0,00768462	0,21806667	0,0247914	0,21633333	0,02858904	0,15493333	0,03869953
780	0,49266667	0,00764286	0,21293333	0,02411666	0,21226667	0,02745275	0,15086667	0,03691739
790	0,48593333	0,00737925	0,20906667	0,02289134	0,20846667	0,02670905	0,1486	0,03503199
800	0,47966667	0,00670025	0,205	0,02376468	0,20506667	0,02651515	0,14593333	0,03372615
810	0,4754	0,00650231	0,20066667	0,02459458	0,20053333	0,02593248	0,14266667	0,03225978
820	0,46986667	0,00620108	0,1978	0,0241603	0,19733333	0,02560026	0,1404	0,03117884
830	0,4638	0,00578619	0,194	0,02350234	0,1932	0,02416526	0,13813333	0,02954341
840	0,45633333	0,00556395	0,1902	0,02324392	0,18906667	0,02203845	0,1364	0,02887144
850	0,45153333	0,00556395	0,1874	0,02351085	0,18653333	0,02195845	0,13393333	0,02730299
860	0,4462	0,00658483	0,18406667	0,02376244	0,18273333	0,02145724	0,1318	0,02647338
870	0,4396	0,00639062	0,1814	0,02313525	0,1792	0,0210295	0,12986667	0,02564397
880	0,43526667	0,00670025	0,17773333	0,02409509	0,17726667	0,02064784	0,128	0,02420248
890	0,42946667	0,0067656	0,1752	0,02360678	0,17406667	0,01996029	0,12646667	0,0229088
900	0,4234	0,00713583	0,1724	0,02368375	0,17106667	0,0192482	0,1244	0,02168594
910	0,417	0,0084664	0,16973333	0,02341993	0,16793333	0,01834375	0,12306667	0,02107162
920	0,41173333	0,00885739	0,16713333	0,02298898	0,16533333	0,01875029	0,12206667	0,02057312
930	0,40386667	0,00741979	0,16513333	0,02239137	0,16293333	0,01818388	0,12006667	0,01883118
940	0,39806667	0,00654388	0,1626	0,02178348	0,15993333	0,01750695	0,11893333	0,01806802
950	0,39286667	0,00522047	0,16066667	0,022203	0,15793333	0,01649404	0,118	0,01735857
960	0,38793333	0,0065615	0,1578	0,02165641	0,155	0,01653118	0,11626667	0,0165606
970	0,37673333	0,01501244	0,1556	0,02070459	0,153	0,0153727	0,11506667	0,01610507
980	0,37346667	0,01462373	0,1536	0,02130164	0,15066667	0,01415533	0,11413333	0,01503272
990	0,3688	0,01405845	0,15173333	0,02051763	0,14866667	0,0143113	0,11213333	0,01349716
1000	0,36486667	0,01304505	0,1496	0,01996096	0,1466	0,01362204	0,11153333	0,01295737
1010	0,36073333	0,01315193	0,14793333	0,01963398	0,14493333	0,0137322	0,11066667	0,01221529
1020	0,3572	0,01241451	0,14473333	0,0175001	0,14333333	0,01261322	0,10973333	0,01142687
1030	0,35226667	0,01194878	0,14306667	0,01770235	0,1412	0,01309656	0,10853333	0,01047346
1040	0,34873333	0,01229851	0,1414	0,01801333	0,13846667	0,0123391	0,115	0,01810746
1050	0,34026667	0,01070763	0,13973333	0,01790456	0,13593333	0,01110735	0,1146	0,018
1060	0,33766667	0,01070389	0,13853333	0,01740958	0,1374	0,01182032	0,114	0,01750086
1070	0,3334	0,01060566	0,137	0,01774148	0,13386667	0,00974953	0,11346667	0,01710478
1080	0,3292	0,00980612	0,13553333	0,01719341	0,1316	0,00993781	0,113	0,01670808
1090	0,32426667	0,00984344	0,13433333	0,01699451	0,13006667	0,00916588	0,11226667	0,01622632
1100	0,3194	0,0116	0,1332	0,01680833	0,1296	0,008544	0,11186667	0,01605034
1110	0,31613333	0,01004258	0,13173333	0,01695799	0,1286	0,00779487	0,1116	0,01586064
1120	0,31233333	0,01121487	0,13086667	0,01672164	0,1274	0,00744849	0,11106667	0,01536793
1130	0,3084	0,0104	0,12966667	0,01652433	0,12613333	0,00733848	0,11053333	0,01499378
1140	0,30486667	0,01041025	0,12846667	0,01665213	0,12546667	0,00704651	0,1102	0,01482296
1150	0,30046667	0,00971665	0,12733333	0,01601791	0,12433333	0,00691761	0,10993333	0,01439768
1160	0,297	0,00973858	0,12633333	0,01615095	0,12366667	0,00597439	0,10953333	0,0144946
1170	0,29346667	0,00853307	0,12546667	0,01607524	0,12326667	0,00587991	0,10893333	0,01377582
1180	0,291	0,00900666	0,12473333	0,01555935	0,122	0,0056107	0,10866667	0,01385689
1190	0,28626667	0,00944528	0,12426667	0,01553877	0,12146667	0,00540123	0,10846667	0,01392743
1200	0,2826	0,01002397	0,123	0,01512481	0,1202	0,00621932	0,10846667	0,01392743
1210	0,2798	0,00945727	0,12213333	0,01490548	0,1196	0,00586174	0,10846667	0,01392743
1220	0,27626667	0,01001665	0,12166667	0,0147585	0,11866667	0,00614925		
1230	0,27266667	0,00996059	0,12086667	0,01462373	0,11813333	0,00600444		
1240	0,26793333	0,01060063	0,12033333	0,01420047	0,1172	0,00628649		
1250	0,26466667	0,00996059	0,11966667	0,01372929	0,11686667	0,00685954		
1260	0,25873333	0,0116779	0,11893333	0,01406319	0,1166	0,00731847		
1270	0,2562	0,01263012	0,11866667	0,01397903	0,1164	0,0076629		
1280	0,2534	0,01202165	0,1182	0,01384052	0,11626667	0,00789261		
1290	0,2506	0,01236608	0,1176	0,01384052	0,116	0,00835225		
1300	0,24106667	0,01966655	0,1172	0,01345362	0,116	0,00835225		
1310	0,2384	0,01916351	0,1098	0,01527482	0,1156	0,00904212		
1320	0,23593333	0,01885983	0,10946667	0,01503241	0,1156	0,00904212		
1330	0,23246667	0,01995228	0,10933333	0,01513847				
1340	0,22893333	0,02056826	0,10886667	0,01467015				
1350	0,22533333	0,0208771	0,10833333	0,0142609				
1360	0,22326667	0,02104693	0,108	0,01402997				
1370	0,22046667	0,0219311	0,10786667	0,01379903				
1380	0,21753333	0,02179388	0,1076	0,01368649				
1390	0,21433333	0,02054296	0,1074	0,01334016				
1400	0,212	0,0207875	0,1072	0,01299384				
1410	0,20766667	0,01855622	0,1072	0,01299384				
1420	0,2058	0,01810746	0,10706667	0,01276297				
1430	0,20286667	0,01924197	0,10686667	0,01241666				
1440	0,20066667	0,01864332	0,10686667	0,01241666				
1450	0,19886667	0,01844379	0,10673333	0,01218578				
1460	0,1966	0,01905046	0,1066	0,01195492				
1470	0,19286667	0,01824317	0,1066	0,01195492				
1480	0,19126667	0,01898666	0,1066	0,01195492				

Teneur en eau réduite (%) pour la cosse de petit pois

Temps(min)	40°C		60°C		80°C		100°C	
	moyenne	écart type	moyenne	écart type	moyenne	écart type	moyenne	écart type
0	1,00008	2E-05	1,00052667	0,00034078	1,00010667	4,6188E-05	1,00008	7,2111E-05
60	0,72413333	0,01084517	0,42114667	0,03652211	0,2828	0,03539629	0,16101333	0,00654001
120	0,52256	0,01344546	0,13657333	0,00688669	0,13303333	0,00583041	0,11287333	0,00053678
180	0,3535	0,01501791	0,12728	0,00362199	0,13176	0,00555741	0,10948667	0,00036295
240	0,23368	0,02069098	0,12582	0,00359672	0,13102667	0,00538637	0,10837333	0,00055582
300	0,16056667	0,00500501	0,12544	0,00356522	0,13055333	0,0051453		
360	0,15052667	0,00513935	0,12500667	0,0034303				
420	0,13846667	0,0009768						
480	0,13787333	0,00104006						
540	0,1353	0,00085135						
600	0,13296667	0,00077777						
660	0,1311	0,0004015						
720	0,13003333	0,00064632						
780	0,13008667	0,00024685						
840	0,12956	0,00053703						
900	0,13022667	0,00072342						
960	0,12972	0,00136396						
1020	0,12972	0,00136396						

teneur en eau réduite (%)pour petit pois (micro onde)

Temps (s)	300W			500W			700W			900W		
	moyenne	écart type		moyenne	écart type		moyenne	écart type		moyenne	écart type	
0		1	0	1,0004	0,00069282			1	0	0,9963333	0,00063509	
15	0,997		0,0016	0,9924	0,0014			0,9918	0,00222711	0,99603333	0,00246644	
30	0,99513333	0,00215716		0,9812	0,0014			0,97806667	0,00422532	0,99033333	0,00461988	
45	0,99393333	0,00166533		0,9664	0,00290517			0,96206667	0,00272274	0,98366667	0,00492375	
60	0,99153333	0,00181475		0,9496	0,00401497			0,9438	0,00586174	0,97376667	0,00702092	
75	0,98793333	0,00253246		0,93106667	0,00856582			0,922	0,00610246	0,9626	0,00886623	
90	0,98433333	0,00248462		0,91133333	0,01047346			0,90713333	0,00041633	0,9495	0,01064378	
105	0,98046667	0,00275923		0,89033333	0,013903			0,88513333	0,00568624	0,9348	0,0112907	
120	0,97566667	0,00372201		0,87053333	0,01531056			0,8606	0,01037111	0,91953333	0,01270328	
135	0,9714	0,00360555		0,85073333	0,01403044			0,83926667	0,01613981	0,90286667	0,01300666	
150	0,96626667	0,00313139		0,83113333	0,01450563			0,81626667	0,02062458	0,88706667	0,01334928	
165	0,9606	0,00311769		0,81046667	0,02063621			0,79633333	0,02320029	0,8704	0,01342572	
180	0,95406667	0,00419682		0,79226667	0,01940034			0,78186667	0,01324588	0,85493333	0,01545067	
195	0,9482	0,00336452		0,77566667	0,01870223			0,76106667	0,01453318	0,83936667	0,01506397	
210	0,94133333	0,00386954		0,7578	0,01723137			0,74253333	0,01639797	0,8234	0,01499633	
225	0,93473333	0,00378065		0,73846667	0,01818278			0,718	0,02771353	0,8071	0,01559359	
240	0,928	0,00366606		0,72313333	0,01668572			0,7	0,02383527	0,79063333	0,01563085	
255	0,9214	0,00310483		0,7068	0,01645479			0,68286667	0,02230007	0,7748	0,01603091	
270	0,91426667	0,00454459		0,69233333	0,01621028			0,67113333	0,02647968	0,76003333	0,01552171	
285	0,9078	0,00341174		0,67666667	0,01469875			0,64546667	0,02362908	0,74493333	0,01580833	
300	0,90226667	0,00291433		0,662	0,01413648			0,62473333	0,02635172	0,72993333	0,01625249	
315	0,897	0,00330454		0,64846667	0,01351493			0,6064	0,02734447	0,71563333	0,01608488	
330	0,8904	0,00421426		0,63553333	0,01122913			0,58966667	0,02593016	0,70133333	0,01635247	
345	0,88473333	0,00380701		0,6212	0,01100364			0,57226667	0,02611462	0,6871	0,01636429	
360	0,87633333	0,00362951		0,6078	0,01104898			0,55693333	0,02694909	0,67356667	0,01692139	
375	0,8706	0,00465188		0,5948	0,00988534			0,54113333	0,02744036	0,65983333	0,01647554	
390	0,86613333	0,00510816		0,5818	0,00936162			0,52646667	0,0260041	0,6462	0,01655023	
405	0,86253333	0,003646		0,57033333	0,00860078			0,51226667	0,02687328	0,63276667	0,01737393	
420	0,85653333	0,00621718		0,55813333	0,00654319			0,49913333	0,02675992	0,61923333	0,01815553	
435	0,85146667	0,0064941		0,5462	0,0086			0,48513333	0,02569851	0,60916667	0,01999233	
450	0,84613333	0,00670025		0,53386667	0,01040064			0,47293333	0,02584363	0,59416667	0,0215408	
465	0,84106667	0,00733848		0,5114	0,0281048			0,4564	0,02466609	0,58146667	0,02270734	
480	0,83586667	0,00820081		0,49733333	0,02675245			0,445	0,02432858	0,56866667	0,02332924	
495	0,83033333	0,00830502		0,4866	0,02755286			0,43186667	0,02443713	0,55553333	0,02250252	
510	0,82546667	0,00909139		0,47506667	0,02667158			0,4172	0,02270771	0,54313333	0,0241009	
525	0,82006667	0,00906495		0,46253333	0,02681964			0,40786667	0,02349496	0,53166667	0,02569228	
540	0,81453333	0,00910897		0,45293333	0,02620407			0,399	0,02364064	0,51853333	0,02566561	
555	0,8072	0,01074058		0,44393333	0,02706314			0,38966667	0,02379103	0,50606667	0,02638794	
570	0,8034	0,0112		0,43433333	0,02696838			0,38026667	0,02437157	0,49383333	0,02705445	
585	0,7986	0,01179322		0,4246	0,02685591			0,37153333	0,02351709	0,48066667	0,02675824	
600	0,79353333	0,01181581		0,41686667	0,02684573			0,36326667	0,02437157	0,46916667	0,02673431	
615	0,78766667	0,01090015		0,4082	0,02719338			0,35473333	0,02393686	0,45743333	0,02671036	
630	0,78286667	0,01206869		0,39966667	0,02760966			0,34726667	0,02395106	0,446	0,02669232	
645	0,7782	0,01178474		0,39086667	0,02636083			0,33973333	0,02500907	0,4331	0,02552313	
660	0,7728	0,01143853		0,38266667	0,0261261			0,33253333	0,02397443	0,4253	0,02678488	
675	0,76646667	0,01305425		0,37553333	0,02538215			0,3252	0,02333152	0,4153	0,02720827	
690	0,75773333	0,01761628		0,36606667	0,02525259			0,31813333	0,02347453	0,40446667	0,02727459	
705	0,75266667	0,01713748		0,3584	0,02517221			0,31093333	0,02293062	0,39363333	0,02694556	
720	0,74913333	0,01698274		0,35073333	0,02392516			0,30386667	0,02170376	0,38426667	0,02782253	
735	0,7442	0,01592859		0,34313333	0,02332581			0,2958	0,02378487	0,37113333	0,02507615	
750	0,73966667	0,01450149		0,33633333	0,02326743			0,29093333	0,02355617	0,36086667	0,02530698	
765	0,73526667	0,01448355		0,3298	0,02249355			0,28293333	0,02167241	0,3505	0,02460975	
780	0,73126667	0,01401761		0,32286667	0,021579			0,27706667	0,02072905	0,3407	0,02451102	
795	0,72586667	0,01610507		0,31606667	0,02241815			0,27073333	0,02016565	0,33137333	0,0249102	
810	0,72106667	0,01597164		0,30993333	0,02107922			0,2656	0,01984843	0,32146667	0,02585369	
825	0,71606667	0,01761855		0,303	0,02114805			0,25973333	0,01955744	0,313	0,02434523	
840	0,7118	0,0173908		0,29546667	0,01747493			0,2534	0,02060291	0,30416667	0,02410505	
855	0,70793333	0,01735089		0,2888	0,01695759			0,24826667	0,02014481	0,2956	0,02377961	
870	0,70293333	0,01759811		0,28233333	0,01572938			0,24353333	0,02003231	0,28723333	0,02297854	
885	0,69793333	0,01882268		0,2776	0,01466561			0,2392	0,01966113	0,27916667	0,02318671	
900	0,6932	0,02022968		0,27133333	0,01525429			0,23453333	0,01865726	0,27053333	0,02314656	
915	0,68826667	0,0187236		0,26546667	0,0150789			0,23013333	0,01797146	0,26136667	0,02208559	
930	0,68473333	0,01971226		0,26086667	0,01435874			0,2262	0,01735166	0,254	0,02176488	
945	0,68053333	0,02014481		0,25553333	0,01372637			0,2212	0,01691035	0,24603333	0,02061318	
960	0,6756	0,0213007		0,25	0,01367041			0,2162	0,01731127	0,23886667	0,02011997	
975	0,669	0,02570058		0,243	0,01452584			0,21226667	0,01747265	0,23196667	0,01984448	
990	0,6648	0,02609904		0,23853333	0,013903			0,20813333	0,01683132	0,2254	0,01950718	
1005	0,6602	0,02523886		0,23206667	0,01200222			0,20493333	0,01625587	0,21856667	0,01861567	
1020	0,65533333	0,02669407		0,22773333	0,01271587			0,20093333	0,015116	0,2121	0,01769068	
1035	0,65133333	0,02642751		0,22213333	0,01414261			0,19686667	0,013903	0,20603333	0,01724017	
1050	0,647	0,02599308		0,218	0,01372734			0,1938	0,01323178	0,19986667	0,01723553	
1065	0,64253333	0,02557916		0,21386667	0,01371471			0,19	0,01259047	0,19426667	0,01619702	
1080	0,63846667	0,02568761		0,21	0,01324085			0,18746667	0,01093679	0,18876667	0,01624479	
1095	0,63486667	0,02444613		0,20706667	0,01305118			0,18426667	0,01055336	0,18276667	0,01532068	
1110	0,63033333	0,0246782		0,20293333	0,01252251			0,18126667	0,01103872	0,17793333	0,01502309	
1125	0,62658	0,02480242		0,1994	0,0110109			0,1786	0,01008167	0,17256667	0,01496173	
1140	0,62266667	0,02493378		0,19606667	0,01066271			0,17586667	0,00925275	0,16793333	0,01408415	
1155	0,61813333	0,02363839		0,1938	0,01042305			0,17193333	0,00986779	0,16303333	0,01385977	
1170	0,6142	0,02388221		0,19033333	0,00981088			0,16946667	0,00987995	0,15636667	0,01292762	
1185	0,61026667	0,02307928		0,18706667	0,00910018			0,16673333	0,00943257	0,15223333	0,01318876	

1200	0,60613333	0,02319511	0,18453333	0,00903622	0,1634	0,00903549	0,14783333	0,01380193	
1215	0,60153333	0,02376244		0,182	0,0089822	0,16153333	0,00881892	0,14403333	0,01410189
1230	0,59753333	0,02478252		0,1788	0,00780769	0,15913333	0,00921159	0,1403	0,01335028
1245	0,592	0,02491506		0,1768	0,00720833	0,15746667	0,00940284	0,1374	0,01335028
1260	0,58613333	0,02678532	0,17426667	0,00680392	0,155	0,008544	0,1342	0,01340448	
1275	0,58213333	0,02675992		0,1726	0,00727461	0,15306667	0,00880076	0,13123333	0,0130251
1290	0,57786667	0,0262917	0,16946667	0,00733848	0,151	0,0093145	0,1287	0,01301038	
1305	0,5742	0,02685591		0,1674	0,00700571	0,15	0,00914112	0,12576667	0,01278176
1320	0,56966667	0,02600795		0,1654	0,00648999	0,14853333	0,00904728	0,1235	0,01273538
1335	0,56573333	0,02653928	0,16386667	0,00612318	0,1474	0,0084	0,12156667	0,01208649	
1350	0,5612	0,02592836	0,16193333	0,00546016	0,14673333	0,00790527	0,1192	0,01130796	
1365	0,5572	0,02672751	0,16033333	0,00541233	0,146	0,00690217	0,1172	0,01110991	
1380	0,5508	0,02781654	0,15913333	0,00555818	0,1446	0,0056	0,11643333	0,01056283	
1395	0,54753333	0,02895606		0,1566	0,00470319	0,14353333	0,00546382	0,11476667	0,00999617
1410	0,54366667	0,02862889		0,1556	0,00450777	0,14306667	0,00496521	0,11066667	0,01227857
1425	0,5392	0,02772652		0,1546	0,00415692	0,1428	0,00452106		
1440	0,53546667	0,02810006		0,1528	0,00207846	0,1426	0,00419047		
1455	0,53193333	0,02730006		0,1514	0,00163707	0,14233333	0,00375411		
1470	0,5288	0,02750055	0,15053333	0,00110151	0,14213333	0,00343123			
1485	0,52513333	0,026601	0,14986667	0,00092376	0,14186667	0,00300888			
1500	0,5218	0,02730055	0,14886667	0,00090185	0,14153333	0,00250067			
1515	0,51766667	0,02600103	0,14813333	0,00120554	0,14146667	0,00240278			
1530	0,51466667	0,02670306	0,14716667	0,00185562	0,1412	0,00202978			
1545	0,51066667	0,02550007	0,1471	0,00195192	0,1412	0,00202978			
1560	0,5074	0,02450061			0,14106667	0,00185831			
1575	0,50353333	0,02480672			0,141	0,00177764			
1590	0,50033333	0,0247114			0,1404	0,00131149			
1605	0,49726667	0,02480027			0,14	0,0014			
1620	0,49366667	0,02451965			0,14	0,0014			
1635	0,4906	0,02431543			0,14	0,0014			
1650	0,487	0,02437458							
1665	0,48353333	0,02452455							
1680	0,48093333	0,02323474							
1695	0,47813333	0,0222012							
1710	0,47473333	0,02300116							
1725	0,47193333	0,02260118							
1740	0,46933333	0,02130196							
1755	0,46626667	0,02040033							
1770	0,46286667	0,02163084							
1785	0,4594	0,02153416							
1800	0,4562	0,02184399							
1815	0,4546	0,0214028							
1830	0,45126667	0,02190008							
1845	0,447	0,02262388							
1860	0,44366667	0,02163084							
1875	0,43926667	0,02150008							
1890	0,43646667	0,02110197							
1905	0,43233333	0,02190008							
1920	0,42926667	0,0219019							
1935	0,42653333	0,02150008							
1950	0,42213333	0,02141526							
1965	0,41813333	0,02230007							
1980	0,415	0,02161111							
1995	0,41173333	0,02282922							
2010	0,40793333	0,02169086							
2025	0,4024	0,02406242							
2040	0,39886667	0,02359689							
2055	0,39613333	0,02458319							
2070	0,39233333	0,02296113							
2085	0,389	0,02255394							
2100	0,3862	0,02233294							
2115	0,38293333	0,02270888							
2130	0,37953333	0,02290182							
2145	0,37546667	0,02294544							
2160	0,37186667	0,02020528							
2175	0,369	0,02010075							
2190	0,3662	0,02010075							
2205	0,3628	0,01960306							
2220	0,35993333	0,01950214							
2235	0,357	0,01890079							
2250	0,35466667	0,01911474							
2265	0,35153333	0,01892547							
2280	0,34793333	0,01880567							
2295	0,34533333	0,01860573							
2310	0,3472	0,02494875							
2325	0,34013333	0,01801814							
2340	0,3372	0,01790754							
2355	0,33473333	0,0184362							
2370	0,3316	0,01830738							
2385	0,32893333	0,01811114							
2400	0,32553333	0,01910218							
2415	0,32246667	0,01910009							
2430	0,31906667	0,01930009							
2445	0,31586667	0,01949906							
2460	0,31326667	0,01867012							
2475	0,31086667	0,01910113							
2490	0,30846667	0,0187033							

2505	0,3056	0,01855909
2520	0,30313333	0,01817838
2535	0,30066667	0,01837643
2550	0,2978	0,01767824
2565	0,29506667	0,0174589
2580	0,29266667	0,01872147
2595	0,28953333	0,01854867
2610	0,287	0,01833794
2625	0,28473333	0,01811114
2640	0,28233333	0,01805584
2655	0,28006667	0,01831866
2670	0,27746667	0,01779026
2685	0,27526667	0,01750695
2700	0,27246667	0,01706966
2715	0,27006667	0,01721434
2730	0,26766667	0,0167873
2745	0,26486667	0,01655576
2760	0,2622	0,01557434
2775	0,2596	0,01508774
2790	0,25713333	0,01497375
2805	0,254	0,01516443
2820	0,25133333	0,01399476
2835	0,24946667	0,01451941
2850	0,24726667	0,01435316
2865	0,24453333	0,01412279
2880	0,24153333	0,012962
2895	0,23953333	0,01261798
2910	0,23766667	0,01294656
2925	0,23533333	0,01253209
2940	0,2328	0,01283121
2955	0,231	0,01318787
2970	0,22886667	0,0132926
2985	0,22673333	0,01323077
3000	0,224	0,013
3015	0,22206667	0,01223983
3030	0,22033333	0,0132217
3045	0,21833333	0,0120355
3060	0,21666667	0,0124231
3075	0,214	0,01265385
3090	0,21246667	0,01211666
3105	0,21046667	0,0119538
3120	0,2082	0,01114989
3135	0,20633333	0,012115
3150	0,2048	0,01186086
3165	0,2032	0,01179322
3180	0,20106667	0,01141461
3195	0,19913333	0,01167961
3210	0,1974	0,01172348
3225	0,19546667	0,01116124
3240	0,19373333	0,01084497
3255	0,19153333	0,01004258
3270	0,1894	0,00942974
3285	0,18746667	0,00896735
3300	0,18606667	0,00916588
3315	0,18353333	0,00770541
3330	0,182	0,00791707
3345	0,18046667	0,00800333
3360	0,1788	0,0078
3375	0,1774	0,0074081
3390	0,17586667	0,00736569
3405	0,1742	0,00720278
3420	0,1732	0,00713583
3435	0,17173333	0,00737925
3450	0,16933333	0,00635715
3465	0,1676	0,00586174
3480	0,16633333	0,00627482
3495	0,1652	0,00582065
3510	0,16393333	0,00590028
3525	0,16253333	0,0060575
3540	0,16173333	0,00568976
3555	0,1602	0,00537029
3570	0,15913333	0,00565803
3585	0,15806667	0,00527763
3600	0,15673333	0,00516269
3615	0,15586667	0,00511599
3630	0,15466667	0,00514328
3645	0,15393333	0,00481802
3660	0,153	0,00454313
3675	0,15166667	0,00395137
3690	0,15073333	0,00405134
3705	0,14986667	0,00402658
3720	0,1488	0,0041328
3735	0,14773333	0,00380701
3750	0,1468	0,0034176
3765	0,14553333	0,00330051
3780	0,145	0,00307896
3795	0,1438	0,00282135

3810	0,14306667	0,003139
3825	0,142	0,00314325
3840	0,14126667	0,00344287
3855	0,14066667	0,00328836
3870	0,14	0,00348712
3885	0,1396	0,00351568
3900	0,13866667	0,00392598
3915	0,13813333	0,00352326
3930	0,13753333	0,0033546
3945	0,13673333	0,00253246
3960	0,13593333	0,00291433
3975	0,135	0,0034176
3990	0,13433333	0,00380701
4005	0,1334	0,00461303
4020	0,13286667	0,00434665
4035	0,1324	0,00461303
4050	0,13193333	0,00491664
4065	0,13133333	0,00463609
4080	0,131	0,00497594
4095	0,1306	0,00497594
4110	0,1304	0,00477912
4125	0,12993333	0,00436501
4140	0,12993333	0,00436501
4155	0,12946667	0,00411015
4170	0,12933333	0,00392088
4185	0,12893333	0,0036074
4200	0,12893333	0,0036074
4215	0,12853333	0,00320832
4230	0,12833333	0,00310054
4245	0,12833333	0,00310054
4260	0,128	0,00290517
4275	0,1278	0,00294618
4290	0,1276	0,00262298
4305	0,12746667	0,00241109
4320	0,12733333	0,00220303
4335	0,12726667	0,00210079
4350	0,12726667	0,00210079
4365	0,12713333	0,00190088
4380	0,12693333	0,00161658
4395	0,1268	0,00144222
4410	0,1268	0,00144222
4425	0,12666667	0,00128582
4440	0,12666667	0,00128582
4455	0,12646667	0,00110151
4470	0,12646667	0,00110151
4485	0,12633333	0,00102632
4500	0,12633333	0,00102632
4515	0,12626667	0,00100664
4530	0,1262	0,001
4545	0,12613333	0,00100664
4560	0,12606667	0,00102632
4575	0,126	0,0010583
4590	0,12593333	0,00110151
4605	0,1258	0,00121655
4620	0,12573333	0,00128582
4635	0,12573333	0,00128582
4650	0,12573333	0,00128582

Résumé

L'objectif de ce travail est d'abord le suivi des cinétiques du séchage assisté par microondes à quatre différents niveaux de puissance (300, 500, 700 et 900 W) et du séchage assisté par étuve ventilée à quatre différentes températures (40, 60, 80 et 100 °C) des gousses de la fève (*Vicia faba* L.) et de petit pois (*Pisum sativum* L.) variété locale. Les résultats obtenus ont révélé que la cinétique de l'eau pour les différentes conditions de séchage a eu une allure exponentielle décroissante. Ensuite, la consommation de l'énergie par les deux méthodes de séchage a été calculée. Enfin, l'effet de ces méthodes de séchage sur les propriétés fonctionnelles, la teneur en chlorophylle et l'indice de brunissement a été étudié. Les résultats obtenus ont révélé que l'utilisation de la micro-onde réduit considérablement le temps de séchage (plus de 50 fois) et la consommation de l'énergie (plus de 42 fois) et préserve mieux la couleur par rapport à l'étuve ventilée.

Mots-clés : Cinétique de séchage, micro-onde, étuve, gousse de la fève, gousse de petit pois, consommation d'énergie.

Abstract

The first objective of this work is the follow up the drying kinetics of microwave-assisted at four different power levels (300, 500, 700 and 900 W) and drying oven at four different temperatures (40, 60, 80 and 100 °C) of the broad bean pods (*Vicia faba* L.) and pea pods (*Pisum sativum* L.) local variety. The results obtained revealed that the kinetics of water for the different drying conditions had a decreasing exponential rate. Then, the energy consumption by both drying methods was calculated. Finally, the effect of these drying methods on functional properties, chlorophyll content and browning index was studied. The results obtained revealed that the use of microwave reduces significantly drying time (more than 50 times) and energy consumption (more than 42 times) and preserves color better than the ventilated oven.

Keywords: Drying kinetics, microwave, oven, broad bean pods, pea pods, energy consumption.