

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ BATNA1 -BATNA-
INSTITUT DES SCIENCES VÉTÉRINAIRES
ET DES SCIENCES AGRONOMIQUES



THESE

Pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Filière

Sciences agronomiques

Option

Technologie Alimentaire

Présentée Par:

ZIDANI SARA

THEME

**Influence des techniques de séchage sur les propriétés
physicochimiques et fonctionnelles de la pomme locale**

JURY

Président	FAHLOUL D.	Professeur	Université Batna 1
Rapporteur	ALLOUI-LOMBARKIA O.	Professeur	Université Batna 1
Examinatrice	ROUBAH-HAMBABA L.	Professeur	Université Batna 2
Examineur	LAROU S.	Professeur	Université Batna 2
Examinatrice	ZITOUNI B.	Professeur	Université Batna 1
Examinatrice	ABDESSEMED D.	Maitre de Conférences	Université Batna 1

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2018/2019

Résumé

Dans le cadre de cette thèse, on a utilisé la variété de la pomme *Golden delicious* jaune, qui provient de la région d'Arris Willaya de Batna. La pomme est coupée en forme de rondelle de 8 mm, puis séchées par deux méthodes, par microonde à différentes puissances (100, 180, 300, 450, 600 et 900W) et dans une étuve sous vide on utilisant trois températures de séchage (45, 55 et 65 °C) couplées à une pression de 200 mbar jusqu'au poids final équivalent à $4\pm 0,5$ % d'humidité résiduelle.

La cinétique de séchage de pomme décrit des courbes régulièrement décroissantes, le temps et l'énergie consommée par le séchage par microonde est nettement inférieur par rapport à celui enregistré par le séchage sous vide.

Les analyses statistiques montrent l'effet des paramètres de séchage sur les propriétés étudiées. La détermination des caractéristiques physicochimiques et les propriétés fonctionnelles révèle des résultats encourageantes dont le séchage par microonde conserve mieux la majorité des caractéristiques physicochimiques (Sucres, polyphénols, Protéines, couleur) alors que une bonne rétention des minéraux est observée pour le séchage sous vide. Les propriétés fonctionnelles (viscosité, gélification) de la pomme séchée par microonde sont plus importantes que celles séchée à l'étuve sous vide.

L'analyse factorielle des correspondances montre que la pomme séchée à 600 W a le profil le plus proche à celui de la pomme fraîche concernant les caractéristiques physicochimiques, elle montre aussi que cette même puissance est étroitement liée aux propriétés de gélification et viscosité par rapport aux autres paramètres de séchage.

Mots clés : *Golden delicious*, séchage, microonde, sous vide, couleur, cinétique, caractéristiques physicochimiques, propriétés fonctionnelles.

ملخص

في إطار هذا العمل، استخدمنا التفاح الأصفر *Golden delicious* من إنتاج مزارع منطقة أريس ولاية باتنة. يتم قطع التفاح الأصفر على شكل دوائر سمكها 8 مم، ثم تجفيفه بواسطة طريقتين، عن طريق الميكروويف باستطاعات مختلفة (100، 180، 300، 450، 600 و 900 واط) وفي مجفف منزوع الهواء باستخدام ثلاث درجات حرارة مختلفة (45، 55 و 65 درجة مئوية) تحت ضغط قدره 200 ملي بار حتى الوصول على وزن نهائي يكافئ رطوبة متبقية قدرها $4\pm 0,5$ %.

النتائج المتحصل عليها: حركية تجفيف التفاح تمثل منحنيات متناقصة بشكل منتظم، والوقت والطاقة المستهلكة بواسطة تجفيف الميكروويف أقل بكثير مقارنة بالذي تم تسجيله بواسطة التجفيف منزوع الهواء.

توضح التحليلات الإحصائية تأثير معاملات التجفيف على الخواص المدروسة. دراسة الخصائص الفيزيوكيميائية و الخصائص الوظيفية تبرز نتائج مشجعة حيث أن التجفيف باستعمال الميكروويف يحفظ بأفضلية أغلبية الخصائص الفيزيوكيميائية (سكر، بروتين، اللون، بولي فينول) في حين نلاحظ احتفاظ جيد للمعادن بالنسبة للتفاح المجفف في مجفف منزوع الهواء. التفاح المجفف بواسطة الميكروويف له خصائص وظيفية (اللزوجة، الهلامية) أفضل مقارنة بالنسبة للتفاح المجفف في مجفف خال من الهواء.

دراسة العوامل بواسطة التحليل العملي للتوافقات تبين أن التفاح المجفف باستطاعة 600 واط هو الأقرب من حيث الخصائص الفيزيوكيميائية بالنسبة للتفاح الطازج، كما تبين ارتباطها القوي بالنسبة للخصائص الهلامية و اللزوجة مقارنة بعوامل التجفيف الأخرى

الكلمات المفتاحية: التفاح من نوع *Golden delicious*، التجفيف الخالي من الهواء، الميكروويف، اللون، الحركية، الخصائص الفيزيوكيميائية و الخصائص الوظيفية

Abstract

As part of this thesis, we used the *Golden delicious* yellow apple variety, which comes from the Arris region (Willaya of Batna). The apple is cut in circular slices of 8 mm, then dried by two methods, by microwave at different powers (100, 180, 300, 450, 600 and 900W) and in a vacuum oven using three temperatures of drying (45, 55 and 65 ° C) coupled to a pressure of 200 mbar to the final weight equivalent to $4 \pm 0,5$ % residual moisture.

The drying kinetics of apple describes regularly decreasing curves, the time and the energy consumed by the microwave drying is significantly lower compared to that recorded by vacuum drying.

Statistical analyzes show the effect of drying parameters on the studied properties. The determination of physicochemical characteristics and the functional properties reveal encouraging results whose drying by microwave preserves better the majority of the physicochemical characteristics (sugars, polyphenols, proteins, color) whereas a good retention of the minerals is observed for the vacuum drying. The functional properties (viscosity, gelling) of the apple dried by microwave are greater than those dried in a vacuum oven.

The factorial analysis of correspondences shows that the apple dried at 600 W has the closest profile to that of the fresh apple concerning the physicochemical characteristics; it also shows that this same power is closely related to the properties of gelling and viscosity in relation to the other drying parameters.

Key words: *Golden delicious*, drying, microwave, vacuum, color, kinetics, physicochemical characteristics, functional properties.

Remerciements

Je remercie en premier lieu Allah le tout puissant pour toute la volonté et le courage qu'il m'a donné pour l'achèvement de ce travail.

Je tiens à exprimer ma très grande gratitude à mon promoteur Madame ALLOUI-LOMBARKIA O., Professeur à l'Université de Batna 1, non seulement d'avoir accepté l'encadrement de ce travail, mais surtout pour son aide, ses orientations judicieuses, sa disponibilité et ses encouragements tout au long de la réalisation du présent travail.

Mes vifs remerciements vont également à Monsieur FAHLOUL D., Professeur à l'Université de Batna 1, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury de la soutenance de cette thèse.

J'adresse mes vifs remerciements à Monsieur LAROUI S. et Madame ROUABAH-HAMBABA L., Professeurs à l'Université de Batna 2. À Madame ZITOUNI B., Professeur à l'Université de Batna 1 et madame ABDESSEMED D., Maitre de conférence à l'Université de Batna 1, pour l'intérêt particulier accordé à mon travail et d'avoir accepté de participer à l'évaluation du présent travail.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur KAHOU A., Ingénieur du laboratoire de recherche sciences des aliments (LSA) Université de Batna 1 pour sa disponibilité.

Je dois aussi exprimer ma profonde gratitude à mes chères collègues, BOUDRAA S., SAADOUDI M., BAISSISSE S. et MIHOUBI A. qui m'ont soutenu tout en pensant aux moments sympathiques qu'on a passés ensemble.

Je ne puis terminer sans adresser une pensée affectueuse à toute ma famille. Je suis heureuse d'avoir pu lire de la joie et de la fierté dans leur regard.

Zidani S.

Production scientifique

Ouvrage

- **Zidani S.**, Boudraa S., Fahloul D., 2016. Influence des techniques de séchage sur la solubilité des protéines de la levure *Saccharomyces cerevisiae* produite dans un milieu à base de datte. Ed. Presse Académiques Francophones paf, 152 p. ISBN :978-3-8416-4106-9

Publications internationales

- **Zidani S.**, Alloui-Lombarkia O, Boudraa S., Saadoudi M., 2017. Effect of Dehydration by microwave on the functional properties of the cultivated apple in Algeria, *Annals Food Science and Technology*, **18** (3) : 424-432.
- **Zidani S.**, Fahloul D., Bacha A., 2012. Effects of pH, NaCl, ethanol and drying methods on the solubility of *Saccharomyces cerevisiae* proteins. *CyTA- Journal of Food*, **10** (1) : 42-47.
- Boudraa S., Fahloul D., **Zidani S.**, Saadoudi M., 2017. Effects of Different Drying Methods on Phenols Contents and Antioxidant Activity of Azaroles (*Crataegus azarolus* L.), *Annals Food Science and Technology*, **18** (1) : 11-19.

Communications internationales

- **Zidani S.**, Fahloul D. et Boudraa S., Alloui-Lombarkia O., 2012. Influence techniques of drying on the solubility of proteins of the yeast *Saccharomyces cerevisiae* produced in a medium containing dates. WASET (World Academy of Science, Engineering and Technology), 28 au 29 November. Paris. (Poster).
- Boudraa S., **Zidani S.** et Fahloul D., 2012. Effects of different drying processes (for microwave and for freeze -dried) on the mineral and vitamin content of the fruit (*Crataegus azarolus* L). WASET (World Academy of Science, Engineering and Technologie), 28 au 29 November. Paris. (Poster).

Communications nationales

- **Zidani S.**, Alloui O., Boudraa S., Saadoudi M., 2017. Effect of Dehydration by microwave on the functional properties of the cultivated apple in Algeria, 1^{ère} Journée Nationale sur la Nutrition et la Sécurité Alimentaire, Batna, Algérie. (Poster).
- Boudraa S., Fahloul D., **Zidani S.**, Saadoudi M. et Mihoubi A., 2017. Effects of Different Drying Methods on Phenols Contents and Antioxidant Activity of Azaroles (*Crataegus azarolus* L.), 1^{ère} Journée Nationale sur la Nutrition et la Sécurité Alimentaire 2017, Batna, Algérie. (Poster).

Table des matières

Index des tableaux	
Index des figures	
Index des Abréviations	
Introduction.....	1
Première partie : Etude bibliographique	
Chapitre 1 : La pomme et ses caractéristiques physicochimiques	
1.1. Historique.....	3
1.2. Description de fruit.....	3
1.3. Données botaniques et anatomiques.....	3
1.4. Variétés de pomme.....	4
1.4.1 Variétés cultivées en Algérie.....	6
1.4.2 Variétés cultivées dans la wilaya de Batna.....	6
1.5. Production de la pomme.....	7
1.5.1. Production dans le monde.....	7
1.5.2. Production dans l'Algérie.....	7
1.5.3. Production dans la wilaya de Batna.....	8
1.6. Critère de classification.....	8
1.7. Composition biochimique.....	9
1.7.1. Hydrates de carbone.....	9
1.7.2. Acides organiques.....	10
1.7.3. Vitamines.....	10
1.7.4. Oligoéléments.....	11
1.7.5. Polyphénols.....	11
1.8. Transformation de la pomme.....	12
1.9. Intérêts nutritionnels et diététiques de la pomme.....	13
Chapitre 2 : Procédé de séchage	
2.1. Définition de la déshydratation.....	15
2.2. Définition du séchage.....	15
2.3. Objectif du séchage.....	15
2.4. Modes de séchage.....	16
2.4.1. Séchage par entraînement.....	16
2.4.2. Séchage par ébullition.....	16
2.5. Avantage et inconvénients du séchage.....	16
2.5.1. Avantage du séchage.....	16
2.5.2. Inconvénients du séchage.....	17
2.6. Principe du séchage.....	17
2.6.1. Transfert de chaleur.....	17
2.6.2. Transfert de matière.....	18
2.7. Cinétique de séchage.....	19
2.7.1. Courbes de séchage.....	20
2.8. Les facteurs qui augmentent la cinétique.....	20
2.9. Procédé du séchage.....	20
2.10. Séchage sous vide.....	21
2.10.1. Objectif.....	21
2.10.2. Avantages et inconvénients.....	21
2.11. Séchage par micro onde.....	21
2.11.1. Définition.....	21
2.11.2. Principe.....	22

2.11.3. Classification des micro-ondes en bandes des fréquences en gammes de longueurs d'ondes.....	22
2.11.4. Avantages et Inconvénients des micro-ondes dans l'alimentation.....	23
2.11.5. L'application du micro- onde dans l'industrie agro- alimentaire.....	23
2.12. Qualité des produits alimentaires après séchage.....	24

Chapitre 3 : Propriétés fonctionnelles des aliments

3.1. Définition des propriétés fonctionnelles.....	26
3.2. Les interrelations entre les propriétés fonctionnelles et les propriétés sensorielles...	26
3.3. Classification des propriétés fonctionnelles.....	27
3.3.1. Propriétés d'hydratation.....	27
3.3.1.1. Capacités de rétention d'eau.....	27
3.3.1.2. Solubilité.....	28
3.3.1.3. Propriétés viscosifiantes.....	28
3.3.2. Propriétés de surface.....	29
3.3.2.1. Propriétés émulsifiantes.....	29
3.3.2.2. Propriétés moussantes.....	30
3.3.3. Propriétés de structuration.....	30
3.3.3.1. Propriétés gélifiantes.....	30
3.4. Applications alimentaires des propriétés fonctionnelles.....	31

Deuxième partie : Etude expérimentale

Chapitre 4 : Matériels et méthodes

4.1. Matériel végétale.....	34
4.2. Méthode d'analyse.....	34
4.2.1. Détermination des caractéristiques morphologiques de la pomme.....	35
4.2.2. Détermination de la teneur en eau de la pomme.....	36
4.2.3. Séchage de pomme.....	36
4.2.3.1. Préparation de l'échantillon.....	36
4.2.3.2. Séchage de la pomme par microonde.....	37
4.2.3.3. Séchage de la pomme à l'étuve sous vide.....	38
4.2.3.5. Courbes représentant la cinétique de séchage.....	39
4.2.3.6. Modélisation de la cinétique de séchage.....	39
4.2.4. Détermination des caractéristiques physico-chimiques de la pomme fraîche et séchée.....	41
4.2.4.1. Mesure du pH (NF V 05-108, 1970).....	41
4.2.4.2. Détermination de l'acidité titrable (NF V 05-108, 1970).....	41
4.2.4.3. Détermination de la teneur en protéines (Méthode de Kjeldahl).....	42
4.2.4.4. Teneur en hydrates de carbones.....	43
4.2.4.4.1. Teneur en sures totaux hydrosolubles (Méthode de Dubois).....	43
4.2.4.4.2. Teneur en sucres réducteurs.....	44
4.2.4.4.3 Teneur en fibres.....	44
4.2.4.4.4. Teneur en pectines.....	45
4.2.4.5. Teneur en micronutriments.....	47
4.2.4.5.1. Teneur en vitamines.....	47
4.2.4.5.1.1. Teneur en β -carotène et α -tocophérol.....	47
4.2.4.5.1.2. Teneur en Acide ascorbique.....	48
4.2.4.5.2. Teneur en cendres (AFNOR NF V 05-113).....	49
4.2.4.5.3. Teneur en éléments minéraux.....	49
4.2.4.6. Mesure de la couleur.....	50
4.2.4.7. Caractérisation phytochimiques.....	53
4.2.4.7.1. Teneur en polyphénols totaux.....	53

4.2.4.7.2. Teneur en flavonoïdes.....	54
4.2.4.7.3. Evaluation de l'activité antioxydante (Test DPPH).....	54
4.2.5. Détermination des propriétés fonctionnelles de la pomme fraîche séchée.....	55
4.2.5.1. Propriétés d'hydratation.....	55
4.2.5.1.1. La capacité d'absorption d'eau et d'huile.....	55
4.2.5.1.2. La solubilité.....	56
4.2.5.1.3. Viscosité.....	56
4.2.5.2. Propriété de surface.....	57
4.2.5.2.1. Capacité émulsifiante et stabilité des émulsions.....	57
4.2.5.2.2. Capacité moussante.....	58
4.2.5.3. Propriété de structuration.....	58
4.2.5.3.1. Capacité gélifiante.....	58
4.2.5.4. Densité.....	59
4.2.6. Analyse statistique.....	59

Chapitre 5 : Résultats et discussion

5.1. Détermination des paramètres physiques de la pomme.....	61
5.2. Détermination de la teneur en matière sèche et la teneur en eau.....	61
5.3. Séchage de la pomme.....	62
5.3.1. Etude de la cinétique de séchage.....	62
5.3.2. Modélisation de la cinétique du séchage.....	65
5.4. Détermination des propriétés physico-chimiques.....	69
5.4.1. pH.....	69
5.4.2. Acidité titrable.....	70
5.4.3. Teneur en protéines.....	72
5.4.4. Teneur en hydrates de carbone.....	73
5.4.4.1. Teneur en sucres totaux.....	73
5.4.4.2. Teneur en sucres réducteurs.....	74
5.4.4.3. Teneur en fibre.....	74
5.4.4.3. Teneur en pectine.....	75
5.4.5. Micronutriments.....	75
5.4.5.1. Teneur en vitamines.....	75
5.4.5.2. Teneur en cendres et en minéraux.....	77
5.4.6. Mesures de la couleur.....	80
5.4.7. Substances phytochimiques.....	88
5.4.7.1. Teneur en polyphénols totaux.....	89
5.4.7.2. Teneur en flavonoïdes.....	90
5.4.7.3. Evaluation de l'activité antioxydant par effet du radical DPPH.....	90
5.5. Analyse factorielle des correspondances (AFC).....	91
5.6. Détermination des propriétés fonctionnelles.....	95
5.6.1. Propriétés d'hydratation.....	95
5.6.1.1. Capacité d'absorption d'eau et d'huile.....	95
5.6.1.2. Solubilité.....	96
5.6.1.3. Viscosité.....	97
5.6.2. Propriétés de surface.....	99
5.6.2.1. Capacité émulsifiante et stabilité d'émulsion.....	99
5.6.2.2. Capacité moussante.....	100
5.6.3. Propriétés de structuration.....	101
5.6.3.1. Capacité gélifiante.....	101
5.6.4. Densité.....	102
5.7. Analyse factorielle des correspondances (AFC).....	104

<i>Conclusion</i>	107
<i>Références bibliographiques</i>	110
<i>Annexes</i>	125

Index des figures

Figure 1 : Coupe longitudinale et transversale d'une pomme.....	4
Figure 2: Principales réactions de dégradations des aliments en fonction de l'aw	19
Figure 3 : Courbes de séchage.....	20
Figure 4 : Spectre électromagnétique.....	22
Figure 5 : Photo représente la pomme utilisée.....	34
Figure 6 : Microonde modèle (GEI07Y SAMSUNG).....	37
Figure 7 : Etuve sous vide modèle Binder VDL 53.....	38
Figure 8 : Rondelles de pomme destinée au séchage.....	39
Figure 9 : Cercle et diagramme de chromacité et le diagramme de chromacité du système xy.....	52
Figure 10 : Evolution de la teneur en eau X (kg d'eau/kg de matière sèche) en fonction du temps (Sec) pour la pomme séchée par microonde.....	62
Figure 11 : Evolution de la teneur en eau X (kg d'eau/kg de matière sèche) en fonction du temps (min) pour la pomme séchée dans une étuve sous vide à 200 mbar.....	63
Figure 12: Modélisation de la cinétique du séchage par microonde : (A) modèle logarithmique (B) modèle Tow-Term.....	66
Figure 13: Modélisation de cinétique du séchage sous vide à 200 mbar (A) modèle Tow-term et (B) modèle logarithmique.....	67
Figure 14 : Paramètre L^* , a^* et b^* de la pomme fraîche.	80
Figures 15 : Rondelles de pomme séchée par microonde à différentes puissances (100, 180, 300, 450, 600 et 900 W).....	80
Figure 16 : Rondelles de pommes séchées à l'étuve sous vide (200 mbar) à trois températures (45, 55 et 65°C).....	81
Figures 17: Paramètres de la couleur (L^* , a^* , b^* , C^* et h°) pour la pomme fraîche et séchée.....	82
Figure 18: Espace de couleur (paramètres L^* , a^* et b^*) pour la pomme fraîche et séchée.....	82
Figure 19 : Paramètres L^* , C^* , h° pour la pomme séchée à 600W (a) et à T 55°C/200mbar (b).....	83
Figure 20 : Angle de couleur h° de la pomme séchée à 600W (a) et à 55°C/200mbar (b).....	83
Figure 21: Distribution des pommes fraîche et séchée sur le diagramme de chromacité.....	86
Figure 22: spectre de principaux pigments naturels des aliments (MacDougall, 2002).	87
Figure 23 : Projection des paramètres de séchage associés aux paramètres physicochimiques de la pomme sur le plan factoriel 1 et 2.....	93
Figure 24 : Projection des paramètres de séchage associés aux paramètres physicochimiques de la pomme sur le plan factoriel 1et 2.....	104

Index des tableaux

Tableau 1 : Les principales variétés de la pomme dans le monde.....	5
Tableau 2 : Différentes variétés dans la wilaya de Batna	6
Tableau 3: Classement de la production de pomme dans le monde	7
Tableau 4 : Evolution de la culture de pommier en Algérie (2010-2015).....	7
Tableau 5 : Production de la pomme dans la wilaya de Batna	8
Tableau 6 : Evolution de la culture du pommier dans la wilaya de Batna.....	8
Tableau 7 : Classification de la pomme.....	9
Tableau 8 : Glucides de la pomme.....	10
Tableau 9 : Composition moyenne en vitamines de la pomme.....	11
Tableau 10 : Composition moyenne en oligoéléments de la pomme.....	11
Tableau 11: Composition en polyphénols de la pomme fraîche.....	12
Tableau 12 : L'interrelation entre les propriétés fonctionnelles et les propriétés sensorielles.....	26
Tableau 13: Classification de la solubilité (en %)......	28
Tableau 14: Facteurs effectuant la gélification des macromolécules.....	31
Tableau 15 : Certain application alimentaire des propriétés fonctionnelles.....	32
Tableau 16 : Principaux modèles de modélisation de la cinétique de séchage.....	40
Tableau 17 : Composantes trichromatiques normalisées.....	51
Tableau 18 : Paramètres morphologiques de la pomme.....	61
Tableau 19 : Teneur en eau et en matière sèche de la pomme <i>Golden delicious</i>	61
Tableau 20 : Temps de séchage et l'énergie consommée pour les deux méthodes de séchage de la pomme.....	63
Tableau 21: Paramètres des deux modèles appliqués pour le séchage par microonde...	68
Tableau 22: Paramètres des deux modèles appliqués pour le séchage à l'étuve sous vide.....	68
Tableau 23 : Le pH de la pomme fraîche et séchée.....	69
Tableau 24 : Acidité titrable de la pomme fraîche et séchée.....	71
Tableau 25: Teneur en protéines de la pomme fraîche et séchée.....	72
Tableau 26 : Teneur moyenne en glucides de la pomme fraîche et séchée (en % MS)..	73
Tableau 27 : Teneur en vitamines de la pomme fraîche et séchée.....	76
Tableau 28 : Taux des cendres et des minéraux de la pomme fraîche et séchée (en % MS).....	79
Tableau 29 : Les résultats des valeurs L*, a*, b*, C* et h° de la pomme fraîche et séchées.....	81
Tableau 30: Changement de la couleur (ΔE) de la pomme séchée à 600W et à 55°C/200 mbar.....	84
Tableau 31: Conversion du système Lab. Au système XYZ et longueur d'onde du pigment dominant.....	85
Tableau 32 : Détermination de x, y et z.....	86
Tableau 33: Indices de dégradation de la couleur (BI, WI et YI) des pommes fraîches et séchées.....	88
Tableau 34 : Caractéristiques phytochimiques de la pomme fraîche et séchée.....	88
Tableau 35: Coordonnés des variables resultants de l'analyse factorielle des correspondances (AFC).....	94
Tableau 36 : Capacité de la rétention d'eau et d'huile de la pomme fraîche et séchée...	95
Tableau 37 : Solubilité de pomme fraîche et séchée.....	97
Tableau 38 : Viscosité de la pomme fraîche et séchée.....	98
Tableau 39 : Résultats de la capacité émulsifiante et la stabilité des émulsions de la pomme fraîche et séchée.....	99

Tableau 40 : Les résultats de La capacité gélifiante en (%) de la pomme fraiche séchée.....	101
Tableau 41 : Résultats de la densité de pomme fraiche et séchée	102
Tableau 42: Coordonnés des variables résultants de l'analyse factorielle des correspondances (AFC).....	105
Tableau 43: Matrice de corrélation (Pearson) entre les paramètres physicochimique et les propriétés fonctionnelles.....	105
Tableau 43: Matrice de corrélation (Pearson) entre les paramètres physicochimique et les propriétés fonctionnelles (suite).....	106

Index des Abréviations

ADN : Acide désoxyribonucléique

AFC : Analyse factorielle des correspondances

AFTER : African Food Tradition Evisited by Research,

anses : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

AOAC : Association of Analytical Chemists

ARN : Acide ribonucléique

AT : Acidité titrable.

CAE : Capacité d'absorption d'eau

CAH : Capacité d'absorption d'eau

CIE : Commission internationale de l'éclairage.

CIQUAL : La table française de référence sur la composition nutritionnelle des aliments

Diff : Diffusivité effective

DNS : Acide di-nitro-3,5 salicylique

DPPH : 2,2-Diphenyl-1-picrylhydazyle

DSA : Direction de service Agricole

EAG : Equivalent acide gallique

EDTA : Ethylène diamine tétra acétique

EQ : Equivalent quercétine

exp : experimental

FAO : Food Agricultural Organisation of the United Nations.

FAO : Food and Agriculture Organisation

g: gramme

GHz : Giga hertz

h : heure

ITAFV : Institut technique de l'arboriculture fruitiers et de la vigne

L : litre

LDL : Low density lipoprotein.

MF : Matière fraîche.

mg : milligramme.

MHz : Méga hertz

min : minute.

mL: millilitre.

mmol : millimole.

MO : Matière organique.

MS : Matière sèche.

ms : masse de la matière sèche

nm : Nanomètre

Pa.s : Pascal par seconde.

pH : Potentiel hydrogène

PPO : Polyphénol oxydase

R² : Coefficient de corrélation

RMS : Erreur quadratique moyenne

Sec : Seconde

T : Température (°C)

t : temps

TAA : Teneur en acide ascorbique.

UV : Ultra-violet.

W : Watt.

X : Teneur en eau base sèche, exprimée en kg d'eau/kg de matière sèche.

X' : Teneur en eau base humide, exprimée en kg d'eau/kg de produit.

µg : microgramme.

ρ : Viscosité.

χ² : ki-carré réduit.

Introduction

Introduction

La pomme est le fruit du pommier commun, *Malus domestica*, de la famille des Rosacées (Sous famille des Pomoïdés) (Hellier et al., 2000). D'un point de vue botanique, La pomme est une baie, c'est-à-dire un fruit charnu sans noyau dur. La pomme est l'un des fruits les plus cultivés au monde surtout dans les zones tempérées avec une production totale de 89 millions de tonnes en 2016 selon les chiffres de la FAO (FAO Stat., 2017).

La culture des pommiers en Algérie sont essentiellement localisés à Médéa, Batna, Tiaret, Blida et Khenchela. La production algérienne de pomme s'est chiffrée à 462815 tonne en 2017 (FAO Stat., 2017). *Golden delicious* est la variété la plus cultivée en Algérie et à Batna (DSA Batna, 2017).

En raison du caractère saisonnier de la production, la conservation des fruits sur de longues durées impose la mise en œuvre de traitements spécifiques permettant l'inactivation des enzymes tissulaires et des microorganismes et la protection contre les contaminations ultérieures (Colas, 2003).

La pomme est transformée en différentes formes (Jus, confiture, compote de, vinaigre, etc....), cette transformation apparait comme la plus importante voie de développement économique, mais en Algérie la transformation est rare. La majorité des pommes produites sont conservées dans les chambres froides, pour être vendus comme fruit entier, mais ceci influe négativement sur le prix et la disponibilité, ainsi que la période de conservation.

Selon Bimbenet et al. (2002), le procédé de séchage est l'une des plus anciennes méthodes de conservation des produits agricoles et alimentaires. Il permet de convertir des denrées périssables en produits stabilisés, par abaissement de l'activité de l'eau (aw) jusqu'à une valeur inférieure à 0,5. La plupart du temps, ces produits sont stockés à température ordinaire, avant d'être utilisé dans un procédé industriel ou dans une préparation culinaire. Le séchage joue un rôle important dans les industries agroalimentaires, à la fois par son influence sur les qualités mécaniques, sensorielles et nutritionnelles des produits, par les possibilités qu'il offre de créer des produits ayant de nouvelles fonctionnalités et par son poids économique, surtout énergétique.

Les propriétés fonctionnelles occupent une place cruciale dans le monde alimentaire. Les propriétés fonctionnelles des protéines et des polysaccharides sont souvent très bien caractérisées. Les propriétés fonctionnelles sont les propriétés physiques ou physico-

chimiques qui ont une incidence sur le comportement sensoriel de celles-ci dans les systèmes alimentaires pendant les transformations technologiques, la préparation culinaire, la conservation et la transformation (Linden et Lorient, 1994).

Les effets de séchage sur les propriétés techno-fonctionnelles et nutritionnelles de la pomme ont fait l'objet de plusieurs études et publications. Les travaux de Vega-Galez et *al.*, (2011), Yan et Kerr (2013), Chong et *al.*, (2013), Chong et *al.*, (2014), Aghilinategh et *al.*, (2015), Cuccurullo et *al.*, (2018) montrent l'influence des traitements thermiques sur les polyphénols, les fibres, la couleur, la densité, la texture et la réhydratation.

Dans le cadre de cette thèse, la problématique évoquée ci-dessus a été appliquée sur la variété de la pomme *Golden delicious* Jaune, qui provient de la région d'Arris Wilaya de Batna.

L'objectif de cette étude est de déterminer les caractéristiques physicochimiques et les propriétés fonctionnelles de la pomme locale *Golden delicious* jaune séchée par deux méthodes de séchage

En première section de ce manuscrit, une étude bibliographique dresse un bilan réparti en trois chapitres :

- Premier chapitre renferme des connaissances sur la pomme et ses caractéristiques physicochimiques données statistiques sur la production, décrit également l'intérêt nutritionnel des produits transformés ;
- Deuxième chapitre décrit le procédé de séchage avec ses avantages et inconvénients, en précisant le séchage sous vide et par microonde, de plus ce chapitre résume les différentes techniques de séchage appliquées pour le séchage de pomme ;
- Troisième chapitre rappelle sur les propriétés fonctionnelles des aliments, classification et interaction avec les autres propriétés surtout les propriétés physicochimiques.

La deuxième section du manuscrit présente la démarche expérimentale adoptée suite à cette étude bibliographique. Elle renferme deux chapitres :

- Un chapitre présente les méthodes de caractérisation mises en œuvre avec les différents appareils utilisés.
- Un chapitre représente les résultats obtenus avec interprétation.

Enfin, une conclusion générale dresse un bilan de l'impact des procédés. Elle propose également quelques préconisations ainsi que des pistes de réflexions sur la poursuite de ce travail.

Première partie :

Etude bibliographique

Chapitre 1 :

*La pomme et ses caractéristiques
physicochimiques*

Ce premier chapitre rappelle l'importance économique et nutritionnelle de la pomme. Il précise également l'organisation anatomique de ce fruit et ses caractéristiques biochimiques, ainsi que les paramètres définissant sa qualité.

1.1. Historique

Le pommier, qui fait partie de la grande famille botanique des Rosacées, est l'espèce fruitière la plus répandue dans le monde. On connaît en effet dans les cinq continents plus de 10 000 variétés différentes de pommes (Dumont, 2010). La pomme est cultivée en Europe et en Asie depuis le premier temps, étant connu par les grecs et les romains. La culture primitive résultant de semis de pépins a donné naissance à de multiples variétés jusqu'à ce qu'a la découverte de la greffe (Dumont, 2010). Ce n'est qu'avec Kingh (1759-1835) que commence la création de nouvelles variétés grâce à l'hybridation (Brown, 1996).

1.2. Description de fruit

La pomme compte parmi les fruits de climat tempéré les plus répandus. C'est du point de vue botanique un piridion (c'est-à-dire un fruit portant une rosette sur le bas, et un pédoncule marqué). C'est un fruit arrondi, de forme quasi sphérique, de 10 à 15 cm de diamètre environ, et de couleur différente selon les variétés et les conditions de végétation. Sa couleur à maturité s'étend du vert au rouge plus ou moins foncé en passant par une grande diversité d'intermédiaires ; vert pâle, jaune, orangé ou de couleurs plus ou moins panachées (Gillard, 2009).

1.3. Données botaniques et anatomiques

Selon Lafon et al. (1996), le pommier est classé botaniquement comme suit :

- Embranchement : Spermaphytes
- Sous Embranchement : Angiospermes
- Classe : Dicotylédones
- Sous Classe : Dialypétales
- Famille : Rosacées
- Sous famille : Pomoïdés
- Genre : *Malus*
- Espèce : *Malus domestica* (BORKH)

D'un point de vue anatomique, trois structures se distinguent dans le fruit au niveau tissulaire (Figure 1) :

- L'épiderme (Peau) : surface du fruit en contact avec le milieu extérieur, représente 2 à 7 % du poids total.

- Le mésocarpe ou parenchyme (chair) : représente 92-97 % du poids total.
- L'endocarpe (zone corticale contenant les pépins, aussi appelé le trognon) : représente 0,05 à 1 % du poids total.

Le mésocarpe occupe la majeure partie du fruit ; c'est le tissu le plus consommé (Colin-Henion, 2009).

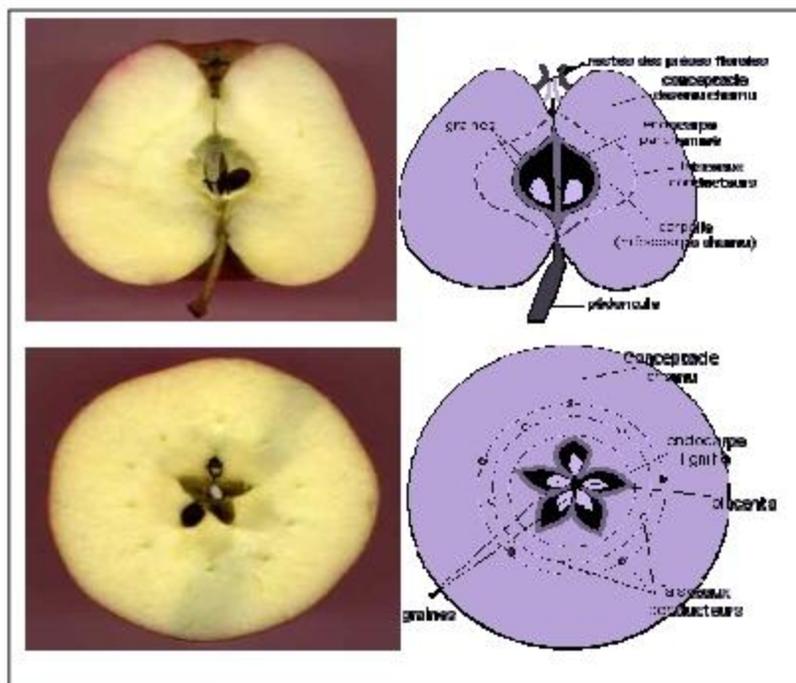


Figure 1 : Coupe longitudinale et transversale d'une pomme (Verdu., 2013).

1.4. Variétés de pomme

Le tableau 1 représente les principales variétés de la pomme cultivées dans le monde

Tableau 1 : Les principales variétés de la pomme dans le monde (Bretauudeau, 1978 ; Lamonaarca, 1985 ; Brossard, 1997).

Variétés	Production	Origine et description
<i>Golden Delicious</i> (Jaune)	<ul style="list-style-type: none"> • La maturité : Septembre • Consommation : Septembre à juin/juillet selon les conditions de récolte • Résistants très bien aux transports, et de très longue conservation surtout en chambre froid 	<ul style="list-style-type: none"> • USA • Fruit de taille moyen • Forme conique • L'épiderme est lisse • Couleur jaune d'or • Chair est blanc jaunâtre • Ferme, fine, juteuse, parfumée • Assez de bonne qualité gustative
<i>Golden Delicious</i> (Rouge)	<ul style="list-style-type: none"> • La maturité : Septembre • Consommation : Octobre à mars 	<ul style="list-style-type: none"> • USA • Dimension supérieure à la moyenne • Coloration rouge sur le fond jaune • Chair est blanc crème • Tendre, juteuse ; très savoureuse, sucrée et délicatement parfumée • Qualité gustative moyenne
<i>Royale Gala</i>	<ul style="list-style-type: none"> • La maturité : 2^{ème} décade d'août – 1^{ère} décade de Septembre • Consommation : Septembre à février 	<ul style="list-style-type: none"> • USA, introduire en Algérie • Fruit moyen, tropique, régulier • L'épiderme rouge orange, strie • Chair fine, blanche • Juteuse très croquante • Bonne qualité gustative
<i>Granny Smith</i>	<ul style="list-style-type: none"> • La maturité : Octobre • Consommation : Octobre à juillet 	<ul style="list-style-type: none"> • Australie, peu cultivé en Algérie • Fruit d'une grosseur moyenne • Couleur verte avec des taches blanche • Chair ferme, juteuse, croquante et très acidulée • Bonne qualité gustative

1.4.1. Variétés cultivées en Algérie

Selon ITAFV (2002), les variétés présentes en Algérie sont les suivantes :

- *Golden delicious* : C'est la plus cultivée en Algérie. Le pommier *Golden delicious* donne une grosse pomme de couleur jaune ou rouge croquante et juteuse. Ils arrivent à maturité en octobre, et se conservent jusqu'en mars.
- *Royal gala* : Les pommes Gala sont plutôt petites. Rouge orangé à rayures verticales, elles résistent bien aux chocs bien qu'elles aient une peau très fine, moyennement cultivée en Algérie.
- *Granny Smith* : Variétés tardives de pomme verte à chair ferme d'origine Australienne peu répandue en Algérie.
- *Jonathan* : Peut cultivée en Algérie, les arbres sont de vigueur moyenne et se ramifient bien, la mise à fruits ressemblant à celle de Golden, les fruits sont plutôt plats, d'un rouge vif non strié. Les zones non exposées à la lumière virant au jaune à maturité, la chair est blanche et le goût est nettement moins sucré.
- *Lorco* : D'origine Espagnol a été introduite en Algérie, le fruit est généralement petit, avec des stries rouges.
- *Starkrimson* : Mutation de *starking delicious*, fruit rouge, mise à fruit plus rapide.

1.4.2. Variétés cultivées dans la wilaya de Batna

Selon la direction des services agricoles de la wilaya de Batna (DSA Batna, 2010), les variétés présentes dans la wilaya de Batna sont :

- *Golden delicious* d'une couleur rouge ou jaune ;
- *Royal gala* d'une couleur rouge ;
- *Starkrimson* d'une couleur rouge ;
- *Hanna* : est une nouvelle variété présente dans la région de Barika précisément dans la commune de Djizzer, c'est un fruit d'une couleur jaune, petit, d'une saveur amère présente dans la saison d'été (Tableau 2).

Tableau 2 : Différentes variétés dans la wilaya de Batna (DSA Batna, 2010)

Variétés	Taux %	Périodes de récolte
<i>Golden delicious</i>	65	Septembre
<i>Starkrimson</i>	16	Septembre
<i>Royal gala</i>	14	Aout
<i>Hanna</i>	05	Juillet

1.5. Production de la pomme

1.5.1. Production dans le monde

La pomme est le troisième fruit consommé dans le monde, après les agrumes et la banane, et les plus cultivées dans le monde, avec une production totale de 89 millions de tonnes en 2017. D'après le tableau 3 la chine est le premier producteur de pommes avec 48 % de la production mondiale (FAO Stat., 2017).

Tableau 3: Classement de la production de pomme dans le monde (FAO Stat., 2017)

Classement	Pays	Production (Tonne)
1	Chine	41390000
2	États-Unis d'Amérique	5173670
3	Turquie	3032164
4	Pologne	2441393
5	Inde	2265000
6	Iran	2096749
7	Italie	1921272
8	Chili	1766210
9	France	1710755
10	Fédération de Russie	1639421
25	Algérie	494239

1.5.2. Production dans l'Algérie

Les principales régions productrices de pomme en Algérie sont Médéa, Khenchla, Batna, Tiaret et Blida. La surface occupée par le pommier est en croissance (FAO Stat., 2015) (Tableau 4)

Tableau 4 : Evolution de la culture de pommier en Algérie (2010-2015) (FAO Stat., 2015).

Année	Surface cultivées (Hectare)	Production (Tonne)
2010	39852	378637
2011	40978	404105
2012	40858	397529
2013	40858	397529
2014	40995	455372
2015	41013	462815

1.5.3. Production dans la wilaya de Batna

La wilaya de Batna est parmi les principales régions productrices de la pomme en Algérie, avec une superficie de 3500 ha et une production de 1050000 Quintaux en 2015 (DSA Batna, 2015). La production concerne de nombreuses zones de la wilaya, principalement: Arris, Menâa, Ichemoul, Teniet El Abed et T'kout (Tableau 5).

Tableau 5 : Production de la pomme dans la wilaya de Batna (DSA Batna, 2015).

Communes	Surface plantée (Hectare)	Production (Quintaux)
Arris	250	63000
Ichemoul	347	20000
Menâa	603	38000
Teniet el Abed	251	34740
T'kout	140	25800

La superficie réservée à cette culture connaît depuis un certain nombre d'année une augmentation importante (Tableau 6), à l'instar des autres régions du pays, la production et le rendement ont certes progressé mais demeurent insuffisants, d'ailleurs au même titre à l'échelle nationale.

Tableau 6 : Evolution de la culture du pommier dans la wilaya de Batna (2010-2015) (DAS Batna, 2016)

Année	Surface cultivées (Hectare)	Production (Tonne)
2010	3319	53262
2010	3475	66140
2011	3640	63568
2012	3500	67700
2013	3583	88780
2014	3679	88624
2015	3690	90000

1.6. Critère de classification

Les pommes font l'objet d'une classification en trois catégories définies ci-après (Tableau 7).

Tableau 7 : Classification de la pomme (Bouhier, 1983).

Catégories	Caractéristiques
Catégorie extra	Qualité supérieure
	La forme, le développement et la coloration typique
	Pourvue du pédoncule intact
	Exempts de défaut
Catégorie I	La pulpe doit être saine
	Bonne qualité
	Un léger défaut dans la forme et le développement
	Un léger défaut dans la coloration
Catégorie II	Le pédoncule peut être légèrement endommagé
	La pulpe doit être saine
	Qualité marchande
	Défauts dans la forme et le développement
	Défauts dans la coloration
	Le pédoncule peut faire défaut sans détérioration de l'épiderme
	La pulpe ne doit pas présenter de défaut essentiel

1.7. Caractéristiques physicochimiques

En règle générale, les pommes à maturité se composent d'environ 85,00 % d'eau, 12,00 à 14,00 % de glucides, 0,30 à 1,00 % d'acide organique, 0,30 % de protéines, une quantité quasi négligeable de lipides (< 0,10 %), des minéraux et des vitamines (Moreiras Tuni *et al.*, 2004). La variation de composition biochimique est liée principalement à la variété, à la maturité et aux conditions agronomiques et pédo-climatiques (Turk, 2010).

1.7.1. Hydrates de carbone

En général, les hydrates de carbone sont classés en trois groupes : les monosaccharides, les oligosaccharides et les polysaccharides. Les monosaccharides comprennent les pentoses (l'arabinose et la xylose) et les hexoses (glucose, fructose, rhamnose, fucose, mannose et galactose). Les monosaccharides principaux des pommes sont le glucose et le fructose. La composition moyenne des hydrates de carbones est présentée dans le tableau 8. Leur concentration peut varier en fonction du degré de maturité. Les oligosaccharides dans la pomme sont représentés par le saccharose. L'apport énergétique est de 54KCalorie (226 Kjoules) pour 100g de pomme fraîche.

Les polysaccharides de la pomme comprennent l'amidon et ceux de la paroi cellulaire. L'amidon (composé d'amylose et d'amylopectine, deux polymères de glucose) s'accumule pendant l'auxèse puis régresse. Il est présent en très faible quantité ou totalement absent dans la pomme à maturité. Les polysaccharides pariétaux regroupent la cellulose, des hémicelluloses et des pectines.

La pomme est riche en fibres alimentaires (de 2 à 3 g/100g). Cette teneur la positionne devant la banane (2,0 g/100g) et l'orange (1,8 g/100g). Une pomme (180 g en moyenne) apporte 5 g de fibres, soit l'équivalent de 200 g de légumes frais ou 150 g de pain blanc. Cet apport est loin de celui fourni par les fruits secs (5 à 10 g/100g) ou le coing (plus de 6 g/100g) mais la forte consommation de pomme en font une importante source de fibres (Tableau 8) (Colin-Henrion, 2008).

Tableau 8 : Glucides de la pomme (Colin-Henrion,2008)

Constituants organiques	Teneur (mg/100g de poids frais)
Sucres réducteurs	8,30
Fructose	5,6
Glucose	1,8
Saccharose	2 -3
fibres	1,60-4
Cellulose	0,90-1,70
Pentosane	0,50
Lignine	0,40
Pectine	0,40

1.7.2. Acides organiques

L'acide malique est l'acide organique le plus abondant dans la pomme (0,3 à 1,0 %). Il est suivi par l'acide citrique (0,0 3%). La quantité d'acides organiques présente peut varier considérablement en raison de la variété, de la maturité, et des conditions environnementales durant la croissance et de stockage (Ackermann *et al.*, 1992).

1.7.3. Vitamines

Dans la pomme, l'acide L-ascorbique (vitamine C) est essentiellement localisée au niveau de la peau et ne se trouve pas en abondance (4,6 mg/100 g de pomme). Il existe d'autres vitamines dont la nature et la teneur sont résumées dans le tableau 9. La vitamine C joue le rôle d'antioxydant. Un antioxydant est un composé qui, par réaction avec les radicaux libres générés par le métabolisme oxydatif en limite les effets néfastes (Turk, 2010) (Tableau 9).

Tableau 9 : Composition moyenne en vitamines de la pomme (USDA, 2004)

Vitamine	A. ascorbique	α - tocophérol	β - carotène	Thiamine	Riboflavine	Niacine	Pyridoxine	Folate
Teneur (mg /100 g de poids frais)	4,6	0,18 [*]	0,003	0,017	0,026	0,091	0,041	0,003

* $\mu\text{g}/100\text{g}$ de poids frais

1.7.4. Oligoéléments

La composition moyenne en oligoéléments d'une pomme est présentée dans le tableau 10. Les oligoéléments comme le fer (Fe), le cuivre (Cu) sont essentiels pour le fonctionnement de certaines enzymes. Par exemple, le cuivre est essentiel pour le fonctionnement du polyphénol oxydase (PPO) qui est responsable de l'oxydation des composés phénoliques en présence d'oxygène. Le calcium (Ca) est un régulateur intracellulaire et un cofacteur (substance dont la présence est nécessaire en plus d'une enzyme pour qu'une certaine réaction se déroule) pour certaines enzymes. Le phosphore est un élément essentiel pour la cellule car il intervient dans la synthèse de l'ATP, de l'ADN et de l'ARN. Le magnésium (Mg) est connu pour intervenir dans au moins 300 réactions enzymatiques. Le potassium (K) est l'ion le plus abondant de la cellule. Sa forte concentration intracellulaire est régulée par la membrane cellulaire par le biais de la pompe sodium-potassium. Le sodium est l'ion prédominant dans le milieu extracellulaire (Turk, 2010).

Tableau 10 : Composition moyenne en oligoéléments de la pomme (Turk, 2010)

Minéraux	Fe	Ca	P	Mg	K	Na	Zn	Cu
Teneur (mg/100g de la pomme fraîche)	0,12	6	11	5	107	1	0,04	0,027

1.7.5. Polyphénols

Les composés phénoliques constituent une des plus importantes classes de métabolites secondaires chez les végétaux. La fonction phénol se définit par un noyau aromatique (C6) substitué par un groupe hydroxyle. Les polyphénols forment un groupe de composés très divers se différenciant par le nombre et l'enchaînement des noyaux aromatiques, le nombre et la position des groupes hydroxyles ainsi que la présence de substituant non phénolique de nature diverse (groupes alkyles, sucres, acides organiques...)

Les polyphénols des pommes sont également des composés aisément oxydables (Robards *et al.*, 1999). Cette sensibilité naturelle à l'oxydation fait qu'ils sont potentiellement oxydés par les formes activées de l'oxygène.

La quantité de composés phénoliques est variable, notamment en fonction de la variété et du mode de culture. Les pommes contiennent 60 polyphénols différents, qui représentent une moyenne de 179,1 mg EAG/100 g de fruit et sont répartis en deux classes principales : les flavonoïdes et les acides phénoliques (tableau 11). Des nombreux composés phénoliques ont été isolés, parmi les quelles les flavonoïdes, qui représentent plus de 80% des polyphénols de la pomme (Wojdylo *et al.*, 2008) . D'après les travaux d'Eberhardt *et al.* (2000) les polyphénols de la pomme sont la principale source du fort potentiel antioxydant de ce fruit. L'activité antioxydante est de 4 à 15 fois plus élevée dans la peau du fruit.

Tableau 11: Composition en polyphénols de la pomme fraîche (Duchene–Massias, 2015)

Classe	Sous classe	Polyphénole	Teneur mg/100g MF	
Flavonoïdes	Anthocyanes	Cyanidine-3-O-galactoside	0,81	
		Cyanidine-3-O-arabinoside	0,06	
		Cyanidine-3-O-xyloside	0,06	
	Dihydrochalcones	Phloridzine	2,75	
		Phlorétine-2'-O-xylosyl-glucoside	2,6	
		3-Hydroxyphlorétine-2'-O-glucoside	0,11	
	Flavanols	(+)-Catéchine	(+)-Catéchine	1,24
			(-)-Epicatechine	8,33
			Procyanidine B2	14,56
		Flavonols	Quercétine	0,13
			Quercétine-3-O-galactoside	2,36
			Quercétine-3-O-glucoside	0,64
			Quercétine-3-O-xyloside	0,78
	Acides hydroxybenzoïques	Quercétine-3-O-rhamnoside	1,33	
Quercétine-3-O-rutinoside		0,23		
Quercétine-3-O-arabinoside		1,4		
Acides phénoliques	Acides hydroxybenzoïques	Acide gentisique	0,22	
		Acide syringique	0,9	
	Acides hydroxycinnamiques	Acide p-coumarique	0,29	
		Acide-5-p-coumaroylquinique	1,05	
		Acide-4-p-coumaroylquinique	2,25	
		Acide caféique	0,42	
		Acide férulique	0,06	
		Acide-4-caféoylquinique	0,54	
		Acide-4-caféoylquinique	13,25	

1.8. Transformation de la pomme

Les différentes méthodes de transformation de la pomme ont pour objectif d'augmenter sa durée de conservation et de préserver au mieux sa qualité organoleptique et nutritionnelle. Les principaux produits issus de la transformation de la pomme sont les compotes, les purées, les concentrés, les jus, les chips, les tranches de pomme surgelées, vinaigre de pomme et la pectine (Espiard, 2002 ; Turk, 2010).

1.9. Intérêts nutritionnels et diététiques de la pomme

La composition variée et équilibrée de la pomme, sa richesse en fibres et en composés phénoliques et son apport pauvre en calories (54 Kcal au 100 g) en font donc un modèle de fruit à valeur santé.

De nombreuses études épidémiologiques menées ces dernières années tendent à montrer que la consommation de pomme est inversement corrélée aux risques de développer de l'asthme, du diabète, certains cancers ou certaines maladies cardiovasculaires (Boyer et Liu 2004; Crozier et Jaganath *et al.*, 2009 ; Verdu, 2013 ; Ferretti *et al.*, 2014) :

- **La pomme et le système digestif** : La pomme contient des fibres insolubles (cellulose, xyloglucanes) et solubles (polysaccharides pectiques). Les fibres peuvent modifier la cinétique de digestion des glucides et lipides présents dans d'autres aliments, ou le degré d'absorption du cholestérol et des acides biliaires. Leur composition chimique et leurs propriétés physico-chimiques ont été largement étudiées, ainsi que leur capacité à réguler le temps de transit, augmenter le volume de selles et leurs effets métaboliques bénéfiques.

Avec un apport calorifique faible, la pomme aide à la régulation du poids.

La pomme est un bon diurétique cette action est liée à sa richesse en eau (85 %) conjuguée à un bon apport en potassium et une faible teneur en sodium. La présence de sorbitol renforce cette action diurétique.

- **La pomme et les maladies cardiovasculaires** : Les chercheurs ont démontrées que les aliments riches en quercétine, comme la pomme, améliorent l'activité antioxydante du sang, et réduisent la vulnérabilité du LDL cholestérol. Les personnes ayant un régime riche en quercétine sont moins exposées que la moyenne des individus aux infarctus et aux attaques cérébrales. La quercétine de pomme protège, en effet, contre l'athérosclérose et les thromboses.
- **La pomme et le diabète de type 2** : L'effet potentiel de la pomme chez le diabétique peut être relié à sa richesse en fibres et en polyphénols. La pectine des pommes peut équilibrer le taux de sucre sanguin. Les sucres naturels des pommes sont lentement digérés et assimilés. Ce phénomènes est sans doute du en partie à l'effet de la pectine, qui forme un gel dans le tube digestif. La lente élévation du taux de sucre sanguin durant la digestion des pommes qu'elles ont un index glycémique faible. Cela en fait un aliment tout indiqué pour les personnes atteintes de diabète.
- **La pomme et les cancers** : De nombreuses études, réalisées avec des molécules antioxydantes de la pomme, des extraits de pulpe, de peau ou de pomme entière, in vitro sur des lignées cellulaires tumorales ou in vivo chez l'animal, ont montré une

action significative sur différents facteurs de la cancérogenèse ou du développement tumoral.

Chapitre 2 :

Procédé de séchage

Ce deuxième chapitre rappelle des généralités sur le séchage. Il précise également les caractéristiques, les avantages et les inconvénients des deux techniques de séchage appliquées dans ce présent travail.

2.1. Définition de la déshydratation

Concentration, dessiccation, séchage, déshydratation : autant de terme que l'on regroupera sous le terme général « d'élimination d'eau ». Toutes ces opérations obéissent aux mêmes lois et leurs objectifs sont les mêmes (Mafart, 1996). L'élimination d'eau d'un produit peut être obtenue par trois voies principales :

- Voie mécanique : Se réalise sans transfert thermique mais par simple transfert de quantité de mouvement. Exemples : la centrifugation, la filtration, égouttage, essorage, pressage, osmose inverse.
- Voie chimique : Méthode extractive basée sur des interactions chimiques ou physiques ou physico-chimiques, tel que la déshydratation imprégnant par immersion.
- Voie thermique : se réalise par un transfert de masse qui nécessite au préalable une activation de l'eau par une certaine quantité d'énergie apportée par un transfert de chaleur (Mafart, 1996 ; Bimbenet *et al.*, 2002).

2.2. Définition du séchage

Par définition, le séchage (en terme proprement dit, au sens thermique) est l'opération ayant pour but d'éliminer, par évaporation ou sublimation, l'eau d'un corps humide (solide ou liquide) (Brennan, 2006).

2.3. Objectif du séchage

L'objectif de sécher un produit est d'abaisser sa teneur en eau, de telle sorte que son activité de l'eau soit portée à une valeur permettant sa conservation à une température ordinaire sur de longues durées (Bimbent, 1984). Le séchage a pour but de :

- Augmenter la durée de conservation des produits agricoles, le séchage est l'une des plus anciennes méthodes de conservation des aliments.
- Stabiliser les produits agricoles et amortir le caractère saisonnier de certaines activités.
- Stabiliser des coproduits industriels pour l'alimentation animale (Pulpes de sucrerie ou d'amidonnerie, drèches de brasserie, Farines de viande et de poisson, lactosérum,)
- Produire des ingrédients ou des additifs pour une seconde transformation, également appelés produits alimentaires intermédiaires (PAI). Ce sont par exemple des fruits pour la pâtisserie, des épaississants, arômes, colorants (Al haddad, 2007).

- Réduction de la masse et le volume des produits, pour faciliter leurs transports, stockage et manutention (Bimbenet et *al.*, 2002 ; Albitar, 2010).

2.4. Modes de séchage

Selon Bimbent (1984) et Charreau et Cavaile (1995) pour les techniques d'élimination d'eau par voie thermique, deux mécanismes peuvent être mis en œuvre pour extraire par évaporation l'eau d'un produit ; des procédés par ébullition et des procédés par entraînement:

2.4.1. Séchage par entraînement

Lorsqu'un produit humide est placé dans un courant de gaz (air ou autre gaz) suffisamment chaud et sec, il s'établit un écart de température et de pression partielle tel que :

- Le gaz apporte au produit une partie de l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau.
- L'eau est évaporée sans ébullition sous l'effet du gradient de pression partielle d'eau. La vapeur d'eau est alors transférée par conduction et convection du produit vers le milieu ambiant et est ensuite entraînée par le gaz.

La température de surface du produit reste toujours inférieure ou égale à celle de l'air et donc nettement inférieure à la température d'ébullition de l'eau (Djerroud, 2010)

2.4.2. Séchage par ébullition

L'ébullition a lieu lorsque la température du produit est élevée à une valeur telle que la pression de vapeur d'eau de ce produit est égale à la pression totale ambiante.

Selon (Djerroud, 2010), il découle de cette définition que :

- La température d'ébullition dépend de la pression totale (elle est plus basse sous vide qu'à pression atmosphérique) ;
- Le gaz en contact avec la surface du produit est de la vapeur d'eau pure.

2.5. Avantage et inconvénients du séchage

2.5.1. Avantage du séchage

Selon Fournier (2003), les principaux avantages du procédé de séchage sont :

- Une durée de conservation des aliments déshydratés qui peut être de plusieurs mois.
- La simplicité de la méthode avec généralement un bon rendement.
- L'universalité du procédé, accessible à tous, y compris pour les particuliers.
- La désactivation des enzymes responsables de la dégradation des aliments
- L'inhibition de la croissance des micro-organismes grâce à la réduction de l'activité d'eau

- La diminution des coûts financiers et environnementaux liés au transport des marchandises en raison de la réduction massive.

2.5.2. Inconvénients du séchage

Comme tous les traitements thermiques, le séchage peut entraîner :

- Des pertes d'arômes, pertes de vitamines et pertes de pigments.
- Des réactions de brunissement, des durcissements superficiels, des modifications irréversibles de texture et donc de la capacité à la réhydratation.
- Des pertes de constituants volatils et la modification de la répartition de l'humidité dans le produit
- Coût de consommation d'énergie.

Le séchage des fruits, des légumes et des épices reste encore une méthode très répandue de conservation de ces aliments (Chakraverty, 2003 ; Fournier, 2003).

2.6. Principe du séchage

Le séchage est un procédé complexe où interviennent des phénomènes de transferts de chaleur et de matière. La génération de la vapeur d'eau peut avoir lieu au sein de la matière ou à sa surface d'échange. Le transfert de matière du volume du corps vers sa surface d'échange a ainsi lieu en phase liquide ou/ et en phase vapeur. Le changement de phase nécessite un apport calorifique extérieur compensant principalement la chaleur nécessaire à la vaporisation (Allaf *et al.*, 2012). Il y a deux processus de transfert dans le séchage :

- Transfert de chaleur, à savoir ;
 - Un transfert de chaleur du milieu extérieur vers la surface d'échange ;
 - Un transfert de chaleur au sein du corps ;
- Transfert de matière, à savoir ;
 - Un transfert de la matière liquide et/ou vapeur, du corps vers sa surface d'échange.
 - Un transport de l'eau sous forme de vapeur vers le milieu extérieur (Nguyen, 2015).

2.6.1. Transfert de chaleur

Selon Kone (2011), le séchage fait appel aux trois méthodes de transfert de chaleur par conduction, par convection et par rayonnement. Ceux-ci sont utilisés seuls ou combinés entre eux. On distingue alors :

- **Séchage par conduction** : L'énergie thermique nécessaire au séchage est contact direct entre le produit et une paroi chauffée.
- **Séchage par convection** :
 - À partir de la vapeur d'eau surchauffée ou de liquide non miscible à vapeur d'eau. Il s'agit alors d'un séchage par ébullition.
 - À partir d'une gaze de vecteur de chaleur. Dans ce cas la gaze sert aussi de vecteur à la vapeur d'eau. C'est un séchage par entraînement.

Le séchage par convection nécessite un apport énergétique important et demande pour être efficace une température relativement élevée quand on élimine de l'eau (60-80°C), ce qui peut poser des problèmes avec les produits thermosensibles dégradables à ces niveaux de température.

- **Séchage par rayonnement** : Ce mode de séchage est basé sur le rayonnement de chaleur à partir d'une source infrarouge (IR) ou une paroi chaude vers la surface du produit à sécher. Le rayonnement est l'énergie émise par la matière sous la forme d'ondes électromagnétiques (photons) à la suite des changements dans les configurations électroniques des atomes ou des molécules.

Contrairement à la conduction et la convection, le transfert d'énergie par rayonnement ne nécessite pas la présence d'un support intermédiaire. En fait, le transfert d'énergie par rayonnement est plus rapide (à la vitesse de la lumière) et il ne subit aucune atténuation dans le vide (Cengel, 2002).

2.6.2. Transfert de matière

- **Définition de la Teneur en eau**

Aucun produit agricole dans son état naturel n'est complètement sec, l'eau est toujours présente. Deux méthodes sont utilisées pour calculer cette teneur en eau. Ces méthodes sont base humide (m) et base sèche (M). A l'aide de masses mesurées de produit pour calculer les teneurs en eau en base sèche par la formule (Siti Zaharah et Razi, 2009).

$$X = \frac{m - ms}{ms}$$

Avec :

X : Teneur en eau en base sèche (kg d'eau/kg de matière sèche)

m : Masse de produit en (g)

ms : Masse de matière sèche de produit en (g).

- **Définition de l'activité d'eau (aw)**

La disponibilité de l'eau dans le produit est un meilleur indicateur de sa nature périssable et qui favorise les activités de dégradation telles que l'action microbienne (Figure 2). L'activité de l'eau (aw) est un terme largement utilisé dans l'industrie alimentaire comme un indicateur de disponibilité de l'eau dans un produit (Wilhelm et al., 2005).

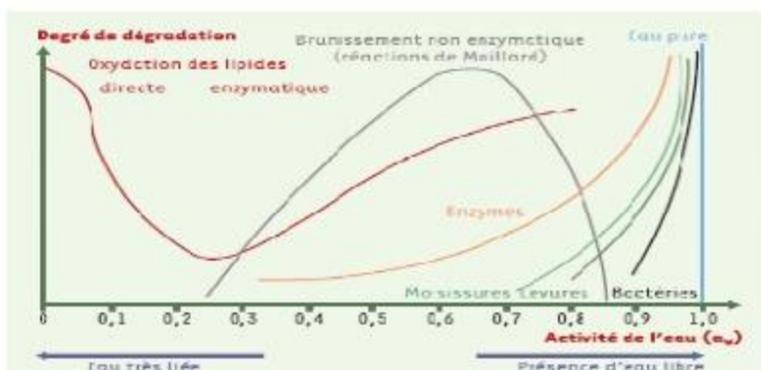


Figure 2: Principales réactions de dégradations des aliments en fonction de l'aw (Albitar, 2010).

2.7. Cinétique de séchage

La teneur en eau d'un produit peut être exprimée par rapport à la masse totale de produit (X') ou par rapport à la masse de matière sèche (X). Les relations liant X avec X' sont les suivantes :

$$X = \frac{X'}{1-X} \qquad X' = \frac{X}{1+X}$$

Avec :

X : la teneur en eau base sèche, exprimée en kg d'eau/kg de matière sèche.

X' : la teneur en eau base humide, exprimée en kg d'eau/kg de produit.

Il est toujours préférable de travailler sur la base de matière sèche, qui seule reste constante au cours de séchage.

Les expériences de laboratoire sont réalisées sur de petites quantités de produit en mesurant la perte de poids d'un produit au cours du temps de séchage en fonction de différents paramètres (vitesse, température, humidité) (Bimbenet, 1984 ; Saravacos, 1995 ; Bimbenet et al., 2002).

2.7.1. Courbes de séchage

Sur la figure 3, on distingue les différentes phases dans le phénomène de séchage par les courbes (a, b et c).

Courbe a : $X = f(t)$. Il s'agit de peser en continu l'échantillon (masse ou teneur en eau X) en fonction du temps.

Courbe b : $dX/dt = f'(t)$ et s'obtient en dérivant la précédente, elle représente la vitesse de séchage, c'est-à-dire la quantité d'eau évaporée par unité de temps.

Courbe c : $dX/dt = f'(X)$ est un autre mode de représentation de la vitesse en fonction du taux d'humidité X.

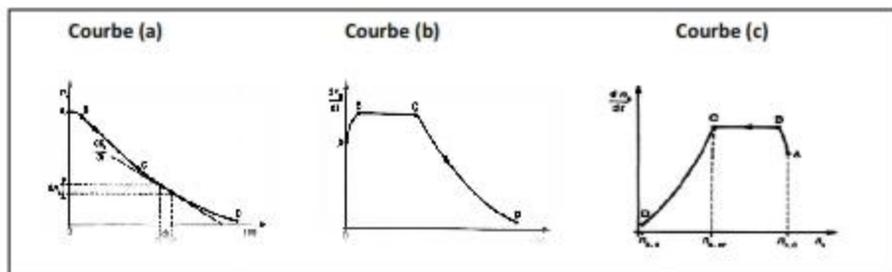


Figure 3 : Courbes de séchage ; a) masse (m) ou teneur en eau (X) du produit en fonction du temps (t) ($X=f(t)$) ; b) l'allure de séchage ($dX/dt = f'(t)$) ; c) l'allure de séchage en fonction du taux d'humidité ($dX/dt=f'(X)$) (Charreau et Cavaille, 1995).

2.8. Les facteurs qui augmentent la cinétique

- La diminution de l'humidité absolue de l'air de séchage.
- L'élévation de la température de l'air de séchage.
- L'augmentation du coefficient de transfert thermique par une augmentation de la vitesse de circulation de l'air.
- L'augmentation de la surface spécifique du produit, ce qui entraîne une augmentation de la surface d'échange. Pendant cette période, la nature du solide et sa structure interne (pores, interstices) n'interviennent pas (Charreau et Cavaille, 1995).

2.9. Procédé du séchage

Il existe une très grande diversité de séchoir, aussi grande que la diversité des produits à sécher. Ils peuvent être choisis selon le principe de séchage (Entraînement ou ébullition), le mode d'apport de la chaleur, le temps de séjour du produit, le mode de manipulation du produit (Solide, liquide, pâteux).

Le choix d'un procédé de séchage dépend des caractéristique physiques (solide de taille plus ou moins grande, liquide plus ou moins visqueux) chimiques (sensibilité à l'oxydation par l'air ou à la chaleur) du produit, la qualité à améliorer et quantité du produit à sécher (Albitar, 2010).

2.10. Séchage sous vide

2.10.1. Objectif

Le séchage sous vide se distingue des autres procédés de séchage artificiel par le fait qu'il se déroule à des niveaux de pression inférieurs à la pression atmosphérique Le vide permet d'abaisser la température d'ébullition de l'eau et donc de limiter des dénaturations d'origine thermique associées aux séchoirs classiques à air chaud (Albagnac et *al.*, 2002).

De par ses caractéristiques de fonctionnement, le séchage sous vide comporte des avantages non négligeables du point de vue de la productivité, de la qualité et de la consommation énergétique (Vincent, 2006).

2.10.2. Avantages et inconvénients

- **Qualité** : Le séchage sous vide possède de caractéristique favorable à l'obtention d'une bonne qualité des produits secs:
 - Le goût naturel du produit est conservé.
 - Fraîcheur, couleur et texture sont conservés jusqu'à l'utilisation.
 - La valeur nutritive est conservée à des temps de conservation plus long.
 - Moins de perte en cuisine et stockage et hygiène maximum dans le réfrigérateur.
- **Energie** : Les temps de séchages plus courts et les températures d'opération plus basses minimisent les pertes de chaleurs des séchoirs sous vide. De plus, aucun échange d'air avec l'extérieur n'est nécessaire car l'opération de séchage est réalisée en circuit ferme. Des essais de laboratoire ont démontré que la consommation énergétique des séchoirs sous vide était inférieure à celle obtenue en séchoir conventionnel (Vincent, 2006).

2.11. Séchage par microonde

2.11.1. Définition

Le mot micro-onde est la traduction littérale de l'anglais microwaves (wave = onde) le terme spécifiquement français est hyperfréquences mais l'utilisation de micro-ondes est plus largement répandue (Combes, 1995).

Les rayonnements micro-ondes sont des ondes électromagnétiques qui se propagent dans le vide à la vitesse de la lumière. Elles sont caractérisées par une fréquence compris entre 300 MHz et 300 GHz, c'est-à-dire par la longueur d'onde compris entre 1m et 1cm.

sur le spectre électromagnétique (Anizon et al. , 2006).

2.11.2. Principe

Selon Kone (2011), le séchage de microonde appartient au type de séchage par ébullition et obéit à un transfert de chaleur par rayonnement. Ce rayonnement, issu des ondes électromagnétiques, a une fréquence qui se situe entre celle de la lumière infrarouge et celle des ondes de télévision. Les fréquences utilisables par les applications industrielles des micro-ondes sont réglementées pour éviter le risque d'interférence avec la radiocommunication et les radars, qui sont les principales utilisations des micro-ondes. La fréquence de 2450 MHz est généralement utilisée.

2.11.3. Classification des microondes en bandes des fréquences en gammes de longueurs d'ondes

Selon (Combes, 1995), on distingue successivement :

- Décimétrique ou ultra hautes fréquence entre 300MHz ($\lambda_0=10\text{dm}$) et 3GHz ($\lambda_0=1\text{dm}$).
- Centimétrique ou supra haute fréquence entre 3GHz ($\lambda_0=10\text{cm}$) et 30GHz ($\lambda_0=1\text{cm}$).
- Millimétrique ou extra haute fréquences entre 30GHz ($\lambda_0=10\text{mm}$) et 300GHz ($\lambda_0=1\text{mm}$).

Dans le spectre électromagnétique Les micro-ondes ou hyperfréquences sont des ondes électromagnétiques qui occupent une bande de fréquence de trois décades de 300 GHz à 300 MHz. les longueurs d'onde associées s'étalent de 1 millimètre (mm) à 1 mètre (m) (Lucchesi, 2005) (Figure 4).

La fréquence la plus utilisée est de 2450 MHz correspondant à la fréquence de la majorité des magnétrons des fours micro-ondes de cuisine ayant une puissance de 600 à 1000 Watts et une longueur d'onde dans l'air de 12,2 cm (Lucchesi, 2005 ; Farhat, 2010).

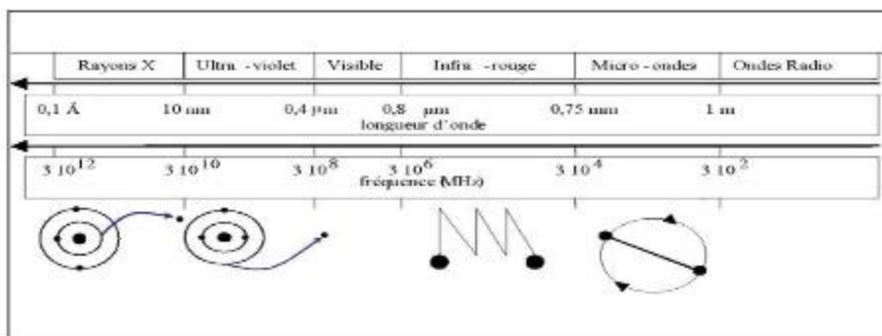


Figure 4 : Spectre électromagnétique (Lucchesi, 2005).

2.11.4. Avantages et Inconvénients des micro-ondes dans l'alimentation

- **Avantages**

- Les applications énergétiques (séchage, chauffage, cuisson, décongélation...).
- Le procédé de chauffage par microondes n'implique pas, contrairement aux autres techniques de décongélation, que la température superficielle du produit soit élevée, et l'on ne crée donc pas des conditions favorables à la multiplication microbienne (notamment les germes pathogènes)
- L'efficacité et la rapidité du chauffage électromagnétique ; Le gain de temps par rapport aux techniques classiques.
- La préservation de la forme et des qualités nutritionnelles et organoleptiques (surtout quand le séchage est effectué sous vide ou par lyophilisation) (par exemple : la réduction du croûtage en surface ou la modification de la porosité).
- La propriété par l'absence d'un vecteur matériel de transfert de chaleur
- Possibilité et facilité de combiner les micro-ondes à d'autres procédés thermiques plus conventionnels (Vachet 1993 ; Al haddad, 2007 ; Curet, 2008).

- **Inconvénients**

- Des risques de surchauffe du produit à sécher s'il s'avère sensible aux microondes.
- De la limitation en puissance thermique (environ 100 kw actuellement).
- Des coûts d'investissement et de maintenance encore élevé (durée de vie des sources micro-onde voisine de 5000 heures équivalentes de 6 mois).
- La température peut être très hétérogène (Vachet, 1993 ; Curet, 2008).

2.11.5. L'application du micro- onde dans l'industrie agro- alimentaire

- **Chauffage industriel et domestique (fours à microonde)**

Les micro-ondes peuvent être appliquées seules ou combinées aux résistances, car le chauffage conventionnel nécessite beaucoup de temps, mais avec micro-onde le temps de chauffage est considérablement réduit.

- **Déshydratation**

Le séchage des produits alimentaires par microondes a fait l'objet de nombreuses études. Ces dernières ont concernés essentiellement les cinétiques de séchage, la combinaison des microondes avec d'autres processus de séchage tels que l'air, la lyophilisation, le séchage sous vide. Ainsi que la modélisation du chauffage et du séchage par microondes (Hill, 1996).

Le microonde permet de transformer en vapeur l'eau des zones profondes sans surchauffer les zones externes et sans provoquer des migrations des solutés à l'intérieure,

- **Décongélation**

Le tempérage est défini comme une remontée en température jusqu'à -2 ou -3 °C maximum, ce qui permet au produit de garder une réserve de froid sous forme de chaleur latente. On se limite le plus souvent à un tempérage qui consiste à amener le produit juste sous la température de fusion, lui conférant une malléabilité suffisante pour de futures opérations. Le procédé de tempérage permet ainsi d'uniformiser la température dans le produit congelé tout en assurant des températures suffisamment basses pour respecter la qualité microbiologique du produit (Curet, 2008).

- **L'extraction des huiles essentielles sans solvant assistée par microonde**

Les nouvelles technologies telle que les extractions par les fluides supercritiques ou par micro-ondes, plus sophistiquées sont désormais mis a contribution a fin de pouvoir obtenir des extraits aromatiques d'origine végétale de qualité accrue et dans des délais plus courts par rapport a ceux des techniques traditionnelles (Lucchesi, 2005).

2.12. Qualité des produits alimentaires après séchage

La qualité d'un produit est son aptitude à satisfaire les besoins exprimés ou implicites des consommateurs. La qualité se distingue par des aspects, à savoir ; santé (qualité alimentaire), sécurité (qualités hygiénique), service (usage, aptitude à la conservation, aspect économique), saveur (qualité organoleptiques et sensorielle) et la qualité technologique (aptitude à la transformation).

La destination alimentaire du produit rend nécessaire, une particulière attention à sa qualité après fabrication et séchage (Bimbenet, 1984). Toute élimination d'eau se heurte aux deux problèmes majeurs suivants :

- Consommation d'énergie considérable: le séchage est responsable de 60 % de la consommation énergétique du secteur agro-alimentaire (Mafart, 1996).
- Risques d'altération de la qualité du produit (Bimbenet, 1984), à savoir :
 - **Modifications biochimiques :**
 - Réaction de Maillard : brunissement non enzymatique résultant de combinaisons entre protéines et glucides,
 - Rancissement : oxydations des matières grasses,
 - Perte d'arome et destruction de vitamines : notamment destruction du la vitamine C et le β -carotène, perte des substances volatiles.

- Dénaturation des protéines, diminuant leur aptitude à se réhydrater lors de l'utilisation du produit et altérant leur pouvoir liant ou moussant,
- Réaction enzymatique au cas où les enzymes n'ont pas été inactivées par un traitement préalable : oxydation des polyphénols qui entraîne par exemple un brunissement des produits secs.
- Modification de la couleur suite à l'altération des pigments ou l'apparition des substances brunes (Mélanoidines) (Lorient, 2003 ; Touati, 2008).
- **Modifications physiques et mécaniques des produits séchés**
- La migration des solutés vers la surface conduisant à une accumulation des sucres et d'autres solutés au niveau de la surface du produit. Cette accumulation est pernicieuse à la qualité du produit qui doit être en général consommé réhydraté.
- La modification de la forme : en règle générale, le départ de l'eau du produit entraîne un effondrement du produit sur lui-même. Toutefois, dans certaines situations, un départ d'eau très rapide et l'existence d'une matrice solide permet d'obtenir un produit de même volume mais d'une structure poreuse (Touati, 2008).

Chapitre 3 :

*Propriétés fonctionnelles
des aliments*

Ce troisième chapitre représente une synthèse générale sur les propriétés fonctionnelles des aliments ; classification, interactions entre constituants et la relation avec les autres caractéristiques de l'aliment.

3.1. Définition des propriétés fonctionnelles

Il s'agit de toute propriété d'une substance qui a une influence sur son utilisation. Les propriétés fonctionnelles utilisables en technologie alimentaire dépendent étroitement des propriétés d'hydratation et de surface qui elles-mêmes résultent d'interactions des divers éléments de structure des macromolécules (polysaccharides et protéines).

Les différentes fonctionnalités peuvent être déclinées sur la base d'interactions moléculaires (interactions entre constituants, et entre les constituants et l'eau) en solution ou aux interfaces, ces interactions sont dépendantes des structures moléculaires et de l'environnement ionique (pH, force ionique, nature des ions) (Romain et al., 2002).

Les facteurs qui interviennent sur la structure et les propriétés fonctionnelles des macromolécules sont principalement :

- La composition du milieu : eau, présence d'autres molécules, pH, force ionique.
- Les traitements physiques ou chimiques qui modifient le milieu (Concentration, séchage, traitements mécaniques) (Linden et Lorient, 1994).

3.2. Les interrelations entre les propriétés fonctionnelles et les propriétés sensorielles

Les interrelations entre les propriétés fonctionnelles et les propriétés sensorielles sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 12 : L'interrelation entre les propriétés fonctionnelles et les propriétés sensorielles (Marlène et Vierling, 2001).

Propriétés fonctionnelles	Propriétés sensorielles
Propriété aux interfaces (émulsification, foisonnement)	Goût et odorat
Interaction avec l'eau (solubilité, viscosité)	Goût et propriétés kinesthésiques (c'est-à-dire la sensation de mouvement)
Texture (consistance à la mastication)	Tact au niveau de la bouche et des doigts, ouïs

3.3. Classification des propriétés fonctionnelles

Les propriétés fonctionnelles sont généralement classées en trois groupes selon les liaisons et les forces mis en jeu :

- **Propriétés d'hydratation** : qui regroupent les relations des macromolécules avec l'eau, qui met en jeu surtout des interactions hydrogène et de Van der Waals. Cela recouvre les propriétés d'absorption, de rétention, de mouillabilité, de gonflement, d'adhérence, de dispersion, de viscosité.... .
- **Propriétés de structuration** : qui regroupent les interactions des macromolécules entre elle par une association intermoléculaire ionique hydrophobe et covalente. Cela recouvre les phénomènes de précipitation, de coagulation, de gélification... .
- **Propriétés de surface (propriété aux interfaces)**: qui regroupent les interactions avec les molécules peu polaires ou avec une phase gazeuse. Les interactions et les forces mises en jeu interviennent donc entre soluté et solvant (eau) ou entre soluté selon le niveau de concentration du soluté dans le solvant. On conçoit ainsi que l'équilibre entre ces deux types d'interaction sera influencé par l'encombrement des molécules de soluté qui dépend lui même de la concentration de leur état d'association (microstructure): cela recouvre les propriétés émulsifiante, moussante... (Linden et Lorient, 1994 ; Alias et Linden, 1994).

3.3.1. Propriétés d'hydratation

Les propriétés d'hydratation sont des attributs des macromolécules insolubles (Thebaudin *et al.*, 1997). L'eau présente dans les polysaccharides peut être classée en deux types :

- Eau retenue par les tensions de surface dans les pores de la matrice fibreuse.
- Eau liée par des liaisons hydrogènes et/ou des interactions hydrophobes sur les groupements chimiques portés par les fibres.

Les principaux paramètres utilisés pour décrire les propriétés d'hydratation sont la capacité de rétention d'eau, le gonflement et l'absorption d'eau.

3.3.1.1. Capacités de rétention d'eau

La rétention d'eau par les poudres peut être expliquée par les faibles quantités d'eau liées fortement structurée (0,2 à 0,5 g d'eau /g matière sèche). Elle peut être aussi due :

- A la pression osmotique créée par la présence de solutés dans les systèmes cellulaires comportant une membrane semi-perméable.
- Aux forces de capillarité dues à l'organisation des molécules de soluté ou en microstructure et dont l'intensité est d'autant plus forte que la taille des mailles est

faible.

Dans les produits alimentaires, ce sont surtout les forces capillaires qui participent à la rétention d'eau (Linden et Lorient, 1994).

3.3.1.2. Solubilité

Cette propriété est particulièrement importante car elle est en relation avec les autres propriétés telles que la viscosité, l'aptitude à la gélification, à l'émulsification ou au moussage. Elle est aussi un critère de dénaturation. Elle dépend de nombreux facteurs: prétraitement de séparation, méthode de concentration et séchage, le pH, la force ionique, la température en présence ou non d'ion Ca^{++} , de sels complexant (Linden et Lorient, 1994).

La solubilité est la quantité maximale d'une substance qui peut être dissoute dans l'eau.

La classification de la solubilité par la FAO est résumée dans le tableau 13.

Tableau 13: Classification de la solubilité (en %) (FAO, 2004)

Solubilité	Classification
< 0,10	Non soluble
0,1 - 1	Légèrement soluble
1 - 10	Moyennement soluble
10 - 100	Assez soluble
> 100	Fortement soluble

3.3.1.3. Propriétés viscosifiantes

La viscosité d'une solution est sa propriété qui tend à empêcher son écoulement lorsqu'elle est soumise à l'application d'une force. Les solutions de grande viscosité résistent à l'écoulement et les solutions de faible viscosité s'écoulent facilement (Multon, 2002).

La plupart des polyosides possèdent la propriété d'augmenter considérablement la viscosité du milieu aqueux pour de faible concentration, souvent inférieur à 1%. Ce pouvoir varie beaucoup d'un polyoside à l'autre : il est très élevé pour la gomme xanthane, les alginates et les galactomannanes, il est beaucoup plus limité pour les pectines et les amidons (Multon, 2002).

Des variations de pH, de température et de force ionique peuvent modifier la viscosité des solutions. Toutefois, elle augmente en milieu alcalin parce que les charges électriques négatives entraînent un déplissement et une élongation maximale des macromolécules. Ce phénomène joue un rôle important dans les aliments liquides tels que les boissons, potages, sauces et

crèmes (Roudot, 2002).

3.3.2.. Propriétés de surface

3.3.2.1. Propriétés émulsifiantes

Selon Linden et Lorient (1994), les émulsions sont des dispersions d'une phase liquide sous forme de gouttelettes (0,1 à 10 μm) dans une autre phase non miscible, elles sont de deux types : gouttelettes d'huile dans l'eau ou gouttelettes d'eau dans l'huile.

Ces substances sont des composés amphiphiles dont la structure chimique comporte à la fois des fonctions hydrophiles et les fonctions hydrophobes. Cette structure chimique particulière leur confère la capacité d'adsorber aux interfaces huile/ eau et d'assurer ainsi la stabilité des émulsions (Multon, 2002).

Les propriétés émulsifiantes sont définies par trois critères :

- Capacité émulsifiante : quantité d'huile émulsifiée par gramme d'émulsifiant au point d'inversion de phase détectée par diminution de viscosité ou de conductivité électrique;
- Activité émulsifiante : aire d'interface stabilisée par gramme d'émulsifiant mesurée par des méthodes optique ;
- Stabilité de l'émulsion : aptitude à conserver la structure de l'émulsion au cours du temps, déterminée par granulométrie ou par évaluation de sa résistance à un traitement physique (centrifugation, chauffage) (Romain *et al.*, 2002).

La formation d'une émulsion qui implique un accroissement de l'aire inter faciale, s'accompagne d'une augmentation de l'énergie libre. La facilité de former une émulsion peut s'évaluer par la mesure du travail mécanique nécessaire à l'émulsification. Plus la tension inter faciale est faible plus l'émulsion est obtenue aisément (Linden et Lorient, 1994).

Marlène et Vierling (2001) montrent qu'il y a trois phénomènes déstabilisant les émulsions:

- Le crémage : c'est la sédimentation des gouttelettes sous l'effet de forces de gravitation (pesanteur, centrifugation).
- La floculation : les gouttelettes s'agglutinent par perte de leurs charges répulsives (modification du pH ou la force ionique).
- La coalescence : au cours du temps, les gouttelettes finissent toujours par entrer en contact et par fusionner.

3.3.2.2. Propriétés moussantes

La mousse est un ensemble de bulles de gaz dispersées dans un liquide, séparées les unes des autres par des films protéiques d'épaisseur plus ou moins grands (Schuhmacher, 2002). Le gaz introduit dans un liquide soit par un ou plusieurs orifices ou à travers un verre fritté (Bullage), soit quant gaz et liquide sont agités ensemble simultanément (Battage, agitation) (Linden et Lorient, 1994).

La formation des mousses consiste les causes suivantes :

- Les causes physiques (Agitation, chutes de liquides, turbulences, transferts).
- Les causes physicochimiques (Composition des milieux, présence d'impuretés organiques et minérales, concentration en éléments tensioactifs ou agents stabilisateurs de mousse, nature des sels minéraux, etc.).
- Les causes chimiques (Formation de gaz par réaction chimique ou biochimique).

Certains facteurs tels que les variations de pH, de température, de concentration peuvent modifier le degré de dispersion ou la solubilité des composés organiques ou inorganiques et agir ainsi sur une meilleure aptitude à provoquer la mousse (Schuhmacher, 2002).

Les propriétés moussantes sont définies par deux critères :

- Capacité moussante : quantité de mousse formée par unité de volume de solution ou de masse de soluté, qui peut également être évaluée par mesure de la masse volumique de la mousse ;
- Stabilité moussante : aptitude de la mousse à conserver sa structure au cours du temps.

En générale, elle est déterminée par mesure du volume de liquide écoulé pour un volume de mousse donné (Romain et al., 2002).

3.3.3. Propriétés de structuration

3.3.3.1. Propriétés gélifiantes

Selon Multon (2002), les gélifiants sont des substances qui ajoutées à une denrée alimentaire, lui confèrent de la consistance par la formation d'un gel.

La gélification est la diminution de la dispersibilité des macromolécules par formation d'un réseau ordonné environné d'eau. Un gel est un système colloïde où les macromolécules (protéines, polysaccharides) s'organisent localement en réseaux à structure figée, entourés d'eau, plus ou moins stables car les interactions macromolécules- eau et eau- macromolécules évoluent vers une organisation plus poussée (Marlène et Vierling, 2001).

La formation de gel nécessite une concentration en macromolécules d'au moins 8 %. La fermeté des gels dépend :

- Des traitements thermiques ; la fermeté s'accroît avec la température.
- Du pH : gel fermé en milieu acide et alcaline, granuleux en pH neutre ou faiblement acide.
- De la concentration protéique ou polysaccharidiques : gels stable à forte concentration.
- Des glucides présents : exemple : le gel lactosérique est plus stable en présence de saccharose (Roudot, 2002).

Chimiquement, un gel se définit comme un réseau continu. Rhéologiquement, il se définit par la prédominance du comportement élastique sur le comportement visqueux. Ces deux composants sont influencés par de nombreux facteurs (Tableau 14) (Tilly, 2007).

Tableau 14: Facteurs effectuant la gélification des macromolécules (Tilly, 2007)

Facteurs intrinsèques	Facteurs extrinsèques
- Matière première	- pH
- Degré d'estérification	- Sucres
- Poids moléculaire	- Température
- Sucres neutres et amidon	- Temps de cuisson
- Groupes acétyles.	- Vitesse de refroidissement
	- Condition de conservation
	- Acidité totale.

3.4. Applications alimentaires des propriétés fonctionnelles

Le comportement des préparations protéiques et polysaccharidique une fois introduites dans des systèmes alimentaires (Tableau 15) comme le pain, les émulsions camées, les fromages fondus, etc.... est bien déterminé.

Tableau 15 : Certain application alimentaire des propriétés fonctionnelles (Linden et Lorient, 1994 ; Marlène et Vierling, 2001 ; Multon, 2002)

Produits	Fonctions
Produits de boulangerie-biscuiterie	rétention d'eau, gélifiant, texture
Pâtes alimentaires	texture
Pâtisserie (meringues, génoises...)	Emulsifiant, moussant, rétention d'eau, gélifiant
Confiserie (caramel, nougats ...), chocolat au lait	Emulsifiant, arôme, texture, dispersibilité
Potages, sauces	Epaississant (interaction avec amidon), émulsifiant
Plats cuisinés	Epaississant, émulsifiant, rétention d'eau
Farines lactées	Solubilité
Boissons lactées ou fruitées	Soluble à chaud ou/et à pH acide, épaississant
Aliments diététiques et infantiles (alimentation entérale ...)	Solubilité, épaississant
Fromages naturels et fondus	Emulsifiant, épaississant, gélifiant
Pâtes à tartiner, Crèmes glacées.	Emulsifiant, épaississant
Crèmes desserts, flans, yaourts.	Emulsifiant, épaississant, gélifiant
Produits carnés (saucisses, pâtés, hamburgers).	Emulsifiant, épaississant, liant, gélifiant, rétention d'eau et de matières grasses.

Deuxième partie :
Etude expérimentale

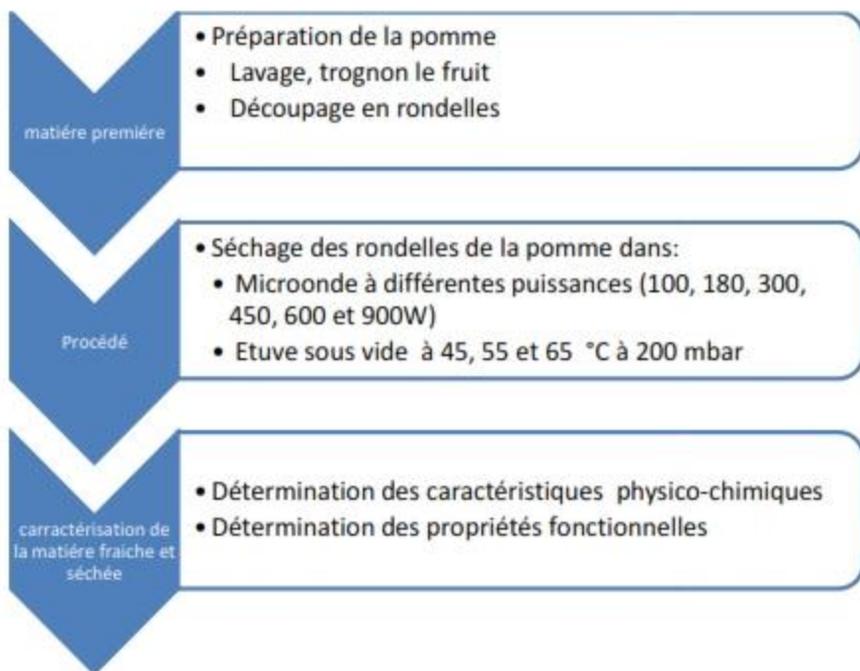
Chapitre 4 :

Matériels et méthodes

Notre étude expérimentale est basée sur l'étude des caractéristiques physico-chimiques et les propriétés fonctionnelles de la pomme locale variété *Golden delicious* d'une couleur jaune, séchée par deux techniques de séchage, par micro-onde et dans une étuve sous vide.

➤ Diagramme du protocole expérimental

La partie expérimentale comprend les étapes suivantes :



4.1. Matériel végétale

La pomme utilisée pour l'étude expérimentale a été prélevé au niveau de la région d'Arris wilaya de Batna. Le prélèvement est effectué durant la période de la récolte de pomme (septembre-Octobre), le fruit est conservé dans une chambre froide à 4 °C, afin d'éviter sa dégradation avant son séchage (Figure 05).



Figure 5 : Photo représente la pomme utilisée.

Le choix de cette variété est basé sur plusieurs critères, à savoir :

- L'importance nutritionnelle de la pomme.
- La disponibilité saisonnière de la pomme sur le marché locale.
- Produits de grande consommation en Algérie.
- Absence ou rareté des voies de transformation des pommes.
- Coût, dépense et insuffisance de la conservation dans les chambres froides.

4.2. Méthode d'analyse

- **Matériel essentiel d'analyse**

Les principaux appareils utilisés sont :

- Bain marie, modèle MEMMERT
- Balance de précision, modèle SARTORIUS
- Appareil de Kjeldhal, modèle BÜCHI 315
- Centrifugeuse, modèle SIGMA 3K 20
- Microonde, modèle SAMSUNG GE107Y
- Etuve sous vide, modèle BINDER VDL 53
- Etuve ventilée, modèle MAMMERT
- Four à moufle, modèle HERAEUS MR170
- pH-mètre, modèle INOLAB

- Chromamètre, modèle KONICA MINOLTA CR-10
- Spectrophotométrie à flamme, modèle JENWAY
- Broyeur domestique modèle SAMSUNG
- Rotavapeur modèle BUCHI R-210
- Agitateur Vortex, modèle IKA-WERK
- Spectrophotomètre UV-visible, modèle SHIMADZU UV-102-01
- Pied à coulisse numérique, modèle HOL.
- Balance de précision, modèle GL 300.
- Agitateur, modèle IKA T25 digital ULTRA TURRAX
- Viscosimètre à bille
- Lyophilisateur, modèle PHYWE CHRIST BETA 1
- Balance, modèle RADWAG AS 220. R2

4.2.1. Détermination des caractéristiques morphologiques de la pomme

- **Principe**

Pour 10 fruits de pomme, les caractéristiques morphologiques, sont déterminées par une balance de précision, un pied à coulisse numérique.

- **Mode d'opérateur**

- Peser le fruit complet ;
- Séparer et peser la partie comestible (peau et chair);
- Peser la partie non comestible (poids de pépin et pédoncule).
- Mesurer la largeur et la longueur
- Evaluation visuelle
- La détermination des rapports entre partie comestible/ fruit et se fait selon les formules suivantes.

$$PPC \% = \frac{PPC}{PF} \times 100$$

Où :

PPC : poids de la partie comestible

PF : poids du fruit.

4.2.2. Détermination de la teneur en eau de la pomme

- **Principe**

La dessiccation de la matière fraîche se fait à la température de $103 \pm 2^\circ\text{C}$ dans une étuve isotherme ventilée à la pression atmosphérique jusqu'à une mesure pratiquement constante (Audigie *et al.*, 1978).

- **Mode opératoire**

- Dans des capsules préalablement lavées, séchées, refroidies et tarées, peser 5g de pomme
- Introduire les échantillons dans l'étuve ventilée à $103 \pm 2^\circ\text{C}$ jusqu'à l'obtention d'un poids constant
- Laisser refroidir les capsules dans un dessiccateur, puis peser.
- La teneur en eau est la différence entre le poids de l'échantillon avant et après la dessiccation lorsque leur poids est constant.

$$H \% = \frac{M1 - M2}{p}$$

$$MS \% = 100 - H\%$$

Où:

H : Taux d'humidité ou la teneur en eau en %

M1 : Masse en g de l'échantillon avant la dessiccation

M2 : Masse en g de l'échantillon après la dessiccation

P : Masse en g de la prise d'essai

MS : Matière sèche en %.

4.2.3. Séchage de pomme

Dans la présente étude deux méthodes de séchage sont appliquées, pour sécher la pomme, à savoir :

- Le séchage par microonde
- Séchage dans une étuve sous vide.

Les paramètres de séchage sont inspirés des travaux de Chong *et al.* (2013), Chong *et al.* (2014), Nguyen (2015), Aghilinategh *et al.* (2015).

4.2.3.1. Préparation de l'échantillon

- Après lavage, les pommes sans trognons sont découpées avec une trancheuse électrique modèle Perfetta DPH (coupe transversale) de 8 mm (figure 9)(annexe2).
- Pour éviter les altérations durant les analyses (Brunissement, oxydation...) les rondelles sont conservées sous un film plastique pour être ensuite séchées.

4.2.3.2. Séchage de la pomme par microonde

Le séchage de la pomme est effectué dans un microonde Modèle SAMSUNG GE107Y. Les dimensions de la cavité de microonde sont 335 mm × 330 mm × 195 mm (Figure 7) avec une fréquence de 2450 MHz et une puissance maximale de 1200 W.

- **Principe de fonctionnement**

Le microonde fonctionne par cycle (30 sec ON / 30 sec OFF), chaque cycle correspond à l'application des microondes à une puissance donnée pendant 30 secondes ON suivi par 30 secondes OFF.

- **Mode opératoire**

- Dans des verres à montre préalablement lavés, séchés, refroidis et tarés, mettre rondelle de pomme puis peser.
- Les verres à montre contenant les rondelles de pomme sont placées dans le microonde (Figure 6)
- Pour l'étude de la cinétique de séchage par microonde, on utilisé six puissances différentes, 100, 180, 300, 450, 600 et 900W
- Après 30 secondes de séchage, les verres à montre sont retirés de microonde et placés dans un dessiccateur puis pesées
- Chaque échantillon est pesé régulièrement pour chaque intervalle de 30 secondes jusqu'à avoir le poids désiré qui est l'équivalent d'une humidité résiduelle de $4 \pm 0,5\%$
- Cette opération est répétée pour toutes les puissances.

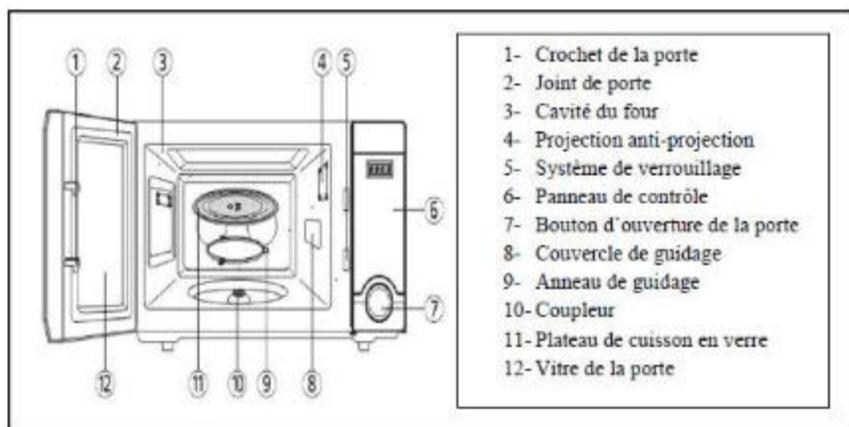


Figure 6 : Microonde modèle (GE107Y SAMSUNG)
(www.samsung.com)

4.2.3.3. Séchage de la pomme à l'étuve sous vide

Le séchage de la pomme est effectué dans une étuve sous vide modèle BINDER VDL 53. Le principe du séchage sous vide est de baisser la pression afin de réduire la température d'ébullition d'eau. Lorsque le vide est assez poussé, l'eau bout à une température inférieure à la température à une pression atmosphérique. De ce fait l'évaporation devient plus rapide.

- **Fonctionnement de l'étuve sous vide**

- Le principe consiste à évaporer l'eau en soumettant les échantillons à l'effet combiné de la chaleur et du vide. La température de l'étuve est contrôlée par le biais d'un régulateur électronique et un manomètre indique la pression interne de la chambre.
- Une pompe à vide externe est entièrement commandée par le biais du panneau de contrôle de l'étuve.
- La pression dans la chambre est contrôlée par un régulateur de débit permettant à tout instant de régler le vide et de créer un flux permettant d'accélérer l'évacuation des vapeurs hors de la chambre (Azani, 2010 ; Lahmari *et al.*, 2012).

- **Mode opératoire**

- Dans des verres à montre préalablement lavées, séchées, refroidies et tarées, peser les rondelles de pomme.
- Les verres à montre contenant les échantillons sont placés à l'étuve sous vide.
- Pour l'étude de la cinétique de séchage par sous vide on utilise trois températures: 45, 55 et 65 C° à une pression de 200 mbar.
- Chaque échantillon est pesé après chaque 30 min, régulièrement, jusqu'à avoir un poids final correspond à $4 \pm 0,5$ % d'humidité résiduelle.

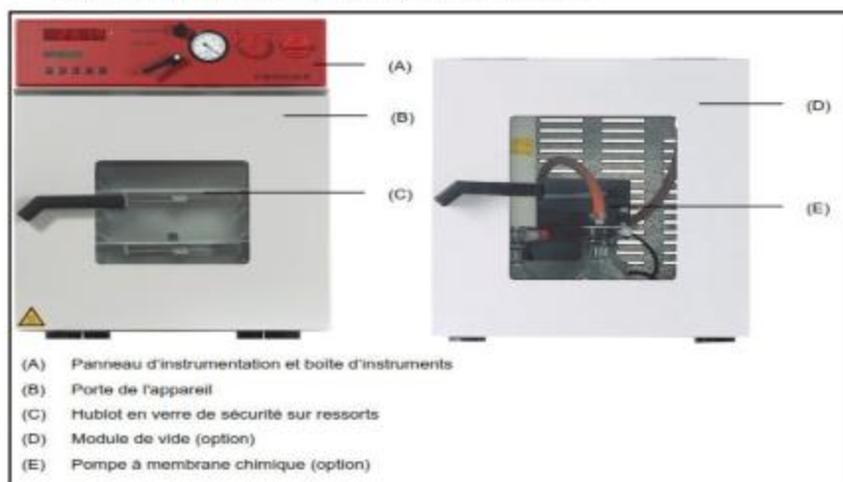


Figure 7 : Etuve sous vide modèle Binder VDL 53 (BINDER GmbH, 2014)



Figure 8 : Rondelles de pomme destinée au séchage

4.2.3.5. Courbes représentant la cinétique de séchage

On entend par courbes de séchage soit les courbes représentant les variations de la teneur en eau (X) en fonction du temps (t) soit celles donnant la vitesse de séchage (dx/dt) en fonction du temps (t) ou de la teneur en eau (X). La courbe obtenue expérimentalement s'obtient en suivant l'évolution de la masse humide du produit Mh en cours du séchage par pesées successives jusqu'à atteindre la teneur en eau finale X_{fin} (Touati, 2008).

A l'aide de la teneur en eau en base humide et la masse du produit mesurée on peut calculer le teneur en eau en base sèche par la formule suivante (Siti zaharah et Razi, 2009) :

$$X = \frac{m - ms}{ms}$$

Où :

X : Teneur en eau en base sèche (Kg d'eau/Kg de matière sèche)

m : Masse du produit en g (en base humide)

ms : Masse de la matière sèche (existant dans la masse du produit(m)).

Au cours du séchage, on a suivi l'évolution de la perte de la masse des rondelles de pomme, pour décrire la cinétique de séchage en traçant les courbes de la variation de la teneur en eau en fonction du temps $X-f(t)$.

4.2.3.6. Modélisation de la cinétique de séchage :

De nombreux modèles empiriques, semi-empiriques ou théoriques ont été proposés pour décrire le comportement des courbes de cinétique de séchage déterminées expérimentalement. Le tableau 16 rapporte les principaux modèles utilisés (Toğrul et Pehlivan 2002 ; Midilli et al., 2002 ; Wang et al., 2007a ; Wang et al., 2007b).

Tableau 16 : Principaux modèles de la modélisation de la cinétique de séchage.

Nom du Model	Modèle
Lewis	$X - \exp(-kt)$
Page	$X - \exp(-kt^n)$
Modified Page	$X - \exp[-(kt)^n]$
Henderson&Pabis	$X - a \exp(-kt)$
Logarithmic	$X - a \exp(-kt) + c$
Two Term	$X - a \exp(-kt) + b \exp(-k't)$
Two Term Exponential	$X - a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-k'at)$
Wang&Singh	$X - 1 + at + bt^2$
Approximation of diffusion	$X - a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$
Verma et al.	$X - a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-k't)$
Modified Henderson&Pabis	$X - a \exp(-kt) + b \exp(-k't) + c \exp(-k''t)$
Simplified Fick's Diffusion	$X - a \exp[-k(t/L^2)]$
Modified Page II	$X - \exp[-k(t/L^2)^n]$
Midilli&Kucuk	$X - a \exp(-kt^n) + bt$

Où

X : teneur en eau (Kg d'eau /kg de MS) ;

a, k, k', k'', n, b et c sont les constantes des modèles

t : temps de séchage .

Dans le présent travail les modèles utilisés pour étudier la cinétique de séchage sont : Logarithmique et Two terms (Chong et al., 2014).

Le coefficient de la corrélation (R^2) est le premier critère utilisé pour Choisir le meilleur modèle qui définit les données expérimentales de séchage, en plus le χ^2 et la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) sont utilisées pour déterminer la qualité de l'ajustement. Ces paramètres sont calculés par les formules suivantes :

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

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

$$R^2 = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}$$

4.2.4. Détermination des caractéristiques physico-chimiques de la pomme fraîche et la pomme séchée

4.2.4.1. Mesure du pH (NF V 05-108, 1970)

- **Principe**

Détermination en unité pH de la différence de potentiel existant entre deux électrodes plongées dans le produit.

- **Mode opératoire**

- Préparer un mélange pomme/eau distillée avec un rapport 1:3 (poids/poids), chauffer au bain-marie pendant 30 min, avec agitation, puis broyer le mélange.
- Etalonner le pH-mètre
- Homogénéiser l'échantillon par une légère agitation
- Introduire l'électrode dans l'échantillon
- Ajuster la température du l'échantillon sur le pH-mètre
- Après stabilisation, Lire la valeur affichée sur le pH-mètre.

4.2.4.2. Détermination de l'acidité titrable (NF V 05-108, 1970)

- **Principe :**

Titration de l'acidité avec une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) en présence de phénolphthaléine comme indicateur.

- **Réactifs**

- Hydroxyde de sodium 0,1N
- Phénolphthaléine : préparé par 10g Phénolphthaléine dans un litre d'éthanol à 95%.

- **Mode opératoire**

- Peser 25 g de l'échantillon
- Placer l'échantillon dans une fiole conique avec 50 ml d'eau distillée chaude récemment bouillie, puis mélanger
- Adapter un réfrigérant à reflux à la fiole puis chauffer la colonne au bain marie 30 min
- Refroidir, verser dans une fiole de 250 ml et les compléter par l'eau distillée bouillie et refroidie puis filtrer le mélange
- Prélever 25 ml du filtrat
- Ajouter 0,25 à 0,5 ml de phénolphthaléine tout en agitant
- Titrer avec la solution de NAOH jusqu'à l'obtention d'une couleur rose, lorsque la couleur rose reste stable pendant 30 secondes, arrêter le titrage.

- L'acidité titrable AT est exprimée en g d'acide malique pour 100g d'échantillon, et calculée par la formule suivante :

$$AT \% = \frac{250 \times V_1 \times N \times 100}{V_0 \times M} \times 0,134$$

Où :

M : Masse en g de produit prélevé (25 g)

V_0 : Volume en ml de la pris d'essai (25 ml)

V_1 : Volume en ml de NaOH épuisé pendant la titration

N : Normalité de NaOH utilisée pour le titrage (0,1N)

0,134 : Facteur de conversion de l'acidité titrable en équivalent d'acide malique. .

4.2.4.3. Détermination de la teneur en protéines (Méthode de Kjeldahl)

• Principe

Le principe de la méthode est basé sur la transformation de l'azote organique en sulfate d'ammonium sous l'action de l'acide sulfurique en présence d'un catalyseur. Le sulfate d'ammonium obtenu est distillé sous forme d'ammoniac et dosé après déplacement, en milieu alcalin (Lecoq, 1965).

• Mode opératoire

Pour un dosage de protéines par la méthode de kjeldahl, on distingue deux étapes :

✓ Minéralisation

- Introduire dans un matras de minéralisation 1 g de l'échantillon à analyser
- Ajouter 25 ml d'acide sulfurique concentré et un catalyseur minéral d'un mélange de sulfate de cuivre à 10% et sulfate de potassium à 90%
- Placer les matras au dispositif de minéralisateur.
- Une fois la solution devient claire, plus ou moins colorée, retirer le matras et laisser refroidir.

✓ Distillation

- Prélever 20 ml de la solution minéralisée à la quelle nous ajoutons 40 ml de soude 6N, puis distiller (Pour alcaliniser fortement le milieu).
- Le distillat est recueilli dans une solution d'acide borique (4%) destinée à fixer l'ammoniac, contenant l'indicateur coloré (Mélange de bleu de méthylène).
- L'excès d'ammoniac est ensuit dosé par l'acide sulfurique 0,05 N (virage au violet).
- En parallèle un témoin est préparé par la même procédure
- La teneur en azote total N est déterminée par la formule suivante :

$$N \% = \frac{V}{V'} \times (n - n') \times 0,05 \times \frac{1,4}{P}$$

Où :

V : Volume de la solution minéralisée complété à 100ml

- V' : Volume de soude ajoutée
- n : Quantité en ml d'acide sulfurique lue après titration
- n' : Quantité en ml d'acide sulfurique lue après titration du témoin
- 0,05 : Normalité de l'acide sulfurique
- P : Poids e la prise d'essai.

- **La conversion**

La teneur en protéine est déterminée en multipliant la teneur en azote total par le coefficient (6,25) (qui correspondant taux moyen de l'azote de 16%. C'est-à-dire 100g de protéine renferme 16g d'azote) (Revuz, 1979).

$$\text{Protéines brutes (\%)} = \text{N \%} \times 6,25$$

4.2.4.4. Teneur en hydrates de carbones

4.2.4.4.1. Teneur en sures totaux hydrosolubles (Méthode de Dubois)

- **Principe**

La méthode Dubois permet de doser les oses en utilisant le phénol et l'acide sulfurique concentré, en présence de ces deux réactifs, les sucres donnent une couleur jaune crème, dont l'intensité est proportionnelle à la concentration des sucres totaux .La densité optique est déterminée à 490 nm (Linden, 1984).

- **Les réactifs utilisés :**

- Eau distillée
- Solution de phénol à 80%
- Acide sulfurique concentré à 98%
- Solution Carrez 1 : Dissoudre l'acétate de zinc 21,9g Zn (CH₃COO)₂ 2H₂O ou 23,8 g de Zn (CH₃COO)₂ 3H₂O et 3g d'acide acétique glacial dans 100 ml d'eau distillée.
- Solution Carrez 2: Dissoudre du ferrocyanure de potassium, 10,6g de K₄Fe(CN)₆ 3H₂O dans 100 ml d'eau distillée.

- **Mode opératoire :**

- **Préparation de l'échantillon à analysé :** Introduire dans un bécher
 - 1g de pomme découpée en petits morceaux
 - Ajouter 50 ml d'eau distillée
 - Laisser le mélange dans un bain marie à 70°C pendant 30 minutes
 - Filtrer le mélange
 - Ajouter 5 ml de Carrez 1 et 5ml de Carrez 2, avec agitation
 - Filtrer le mélange pour une deuxième fois et compléter le volume à 100 ml par l'eau distillée

- Dosage

- Dans un tube à essai prélever 0,5 ml de l'échantillon au quel on ajout 0,5 ml de phénol à 5 % et 3 ml d'acide sulfurique à 98%
- Bien mélanger et mettre le tube dans un bain-marie à 70°C pendant 5 min
- laisser refroidir les tubes dans l'obscurité pendant 15min
- Faire une lecture dans un Spectrophotomètre UV-visible, modèle SHIMADZU UV-102-01, à une longueur d'onde de 490 nm.
- La concentration en sucres totaux est déduite à partir des gammes d'étalonnage établies avec des solutions du glucose (0 à 0,15 mg/ml) (voir annexe 1).

4.2.4.4.2. Teneur en sucres réducteurs (Miller, 1956).**• Principe**

Les sucres réducteurs sont déterminés par spectrophotométrie selon la méthode de Miller (1956), en utilisant le réactif DNS (Acide di-nitro-3,5 salicylique), qui donne une coloration orangée en présence des sucres réducteurs. L'intensité de la coloration est proportionnelle à la concentration des sucres réducteurs.

• Mode opératoire

- Pour réaliser le dosage, mettre dans un tube à essai ; 1 mL de réactif de DNS et 1 mL d'échantillon à analyser (Echantillon est préparé de la même façon que les sucres totaux (voir 4.2.4.4.1).
- Après homogénéisation, porter le mélange à 100 °C pendant 10 minutes.
- A la sortie du bain-marie, refroidir immédiatement les tubes à essais dans un bain de glace pour arrêter la réaction.
- Ajouter 10 ml d'eau distillée pour chaque tube et homogénéiser le contenu des tubes.
- La lecture de l'absorbance se fait dans un Spectrophotomètre UV-visible, modèle SHIMADZU UV-102-01, à une longueur d'onde de 540 nm.
- La teneur en sucres réducteurs est déduite en se référant à la gamme d'étalonnage établies avec des solutions du glucose (0 à 0,2 mg/ml) (voir annexe 1).

4.2.4.4.3 Teneur en fibres**• Principe**

Les fibres constituent le résidu organique obtenu après deux hydrolyses successives (en milieu acide et en milieu alcalin) suivie par une complexation avec l'EDTA (AFTER, 2010).

• Réactif

- H₂SO₄ 0,3N

- NaOH 1,5N:
 - EDTA (Ethylène diamine tétra acétique)
 - Acétone à 99%
 - Eéthanol à 99,8%
- **Mode opératoire :**
 - Peser dans le ballon 0,2 à 1g de l'échantillon préalablement broyé
 - Ajouter 50 ml de H₂SO₄ 0,3N.
 - Chauffer à douce ébullition pendant 30min et agiter doucement toutes les 5 min en évitant que la matière adhère aux parois du ballon
 - Ajouter par le haut du réfrigérant 25ml de NaOH 1,5N
 - Chauffer de nouveau pendant 25 min
 - Mettre une pincée (environ 0,5g) d'EDTA et laisser au feu pendant 5min ;
 - Filtrer à chaud au creuset filtrant de porosité 2
 - Laver avec 25 ml de H₂SO₄ (0,3N) puis avec 3 portions de 50 ml d'eau distillée, ensuite 25 ml d'éthanol et enfin 25 ml d'acétone
 - Sécher le creuset à l'étuve à 130°C pendant 2 h
 - Laisser refroidir au dessiccateur et peser
 - Porter au four à moufle et incinérer à 400°C pendant 2h
 - Laisser refroidir à nouveau au dessiccateur et peser.
 - La teneur en fibre est calculée par la formule suivante :

$$\text{Fiber \%} = \frac{(M_1 - M_2)}{M} \times 100$$

Où :

M₁ : masse du creuset + matière après séchage à étuve

M₂ : l masse du creuset + matière après incinération au four

M : masse de l'échantillon.

4.2.4.4.4. Teneur en pectines

L'extraction des pectines des différents types d'échantillons se fait en milieu acide à chaud, selon le protocole inspiré de Kratchanova et *al.* (2004).

- **Solubilisation et filtration**
 - à 20 grammes de l'échantillon on ajoute 300 ml d'eau distillée, le pH est ramené à 1,5 par de l'acide chlorhydrique 0,5 N.
 - Le mélange est chauffé pendant 01 heure à 80-82 °C, sous agitation continue au moyen d'un agitateur continue.

- A la fin de la solubilisation, le jus pectique est immédiatement filtré (à travers un tissu de mousseline) et refroidi pour éviter l'éventuelle augmentation de la viscosité et la dégradation de la pectine.
- Le jus pectique obtenu est conservé à 4° C pendant 24 heures. Puis, il est clarifié par centrifugation (300 tours/ min) pendant 10 min pour permettre l'élimination des particules en suspension encore présentes et assurer une meilleure clarification.

- **Précipitation**

- À un litre de jus pectique, on ajoute 50 ml de sulfate d'aluminium (Al^{+3} , d' $Al^2(SO_4)_3$ 18 H_2O) 1N goutte à goutte, suivi d'un ajustement du pH à la valeur de 4 par l'ammoniaque (NH_4OH) 5N, sous agitation continue pendant 15 mn.
- On laisse le mélange se stabilise pendant 30 min à la température ambiante puis 01 heure à 4° C, ce qui permet la formation du gel pectine- hydroxyde d'aluminium, le gel obtenu est récupéré par filtration à travers un tissu.

- **Purification des pectines :**

Les gels pectine- hydroxyde d'aluminium subissent plusieurs lavages ayant pour but d'éliminer les impuretés précipitées avec les pectines et l'excès d'aluminium. Les pectines subissent les lavages suivants :

- Le premier lavage à l'éthanol 96 %
- Le deuxième lavage à l'alcool acidulé (éthanol 70 % à 0,5 % Hcl)
- Le troisième lavage à l'alcool 70 % au pH neutre
- Le quatrième lavage à l'acétone, permet d'éliminer les traces d'acide (Hcl) et d'alcool absorbées par les pectines et d'émettre celles-ci et de faciliter leur séchage (McCready, 1970 ; Constenla et Lazano, 2003).

- **Rendement en pectines**

Après extraction, les pectines humides obtenues sont lyophilisées PHYWE Christ BETA 1 à - 40°C/24h et pesées, le rendement est exprimé en poids de pectines sèches extraites à partir de 100 g matière fraîche selon la formule suivante donnée par Ptichkina *et al.* (2008) :

$$R (\%) = \frac{P}{P'} \times 100$$

Où :

P : Poids de pectines lyophilisées,

P' : Poids de la matière première fraîche.

4.2.4.5. Teneur en micronutriments

4.2.4.5.1. Teneur en vitamines

4.2.4.5.1.1. Teneur en β -carotène et α -tocophérol

- **Principe**

Le ferricyanure brun en solution alcool chloroformique est réduit rapidement et quantitativement par le α -tocophérol et le β -carotène en donnant une coloration bleue uniforme de ferricyanure ferreux (Lecoq, 1965).

- **Réactifs**

- Acide ascorbique
- Méthanol 96°
- n-hexane
- Ferricyanure de potassium 1%
- α -Tocophérol
- β -carotène
- Hydroxyde de potassium KOH 50%
- Chlorure ferrique 1.5%
- Chloroforme.

- **Mode opératoire**

- **Extraction des vitamines (α -Tocophérol et β -carotène)**

- Peser 2,5 g d'échantillon broyé.
- Ajouter 0,125 g d'acide ascorbique, 25 ml de Méthanol et 2 ml d'eau bi-distillée
- Ajouter 2,5 ml de la solution d'hydroxyde de potassium 50 %
- La saponification dure de 15 à 45 min à une température de 80 à 100 °C.
- Le α -Tocophérol et le β -carotène sont extraits de la solution de saponification à l'aide de 25 ml de n-hexane, l'extraction est répétée 4 fois.
- Les extraits sont lavés 4 fois avec 25 ml d'eau distillée, puis évaporés à l'aide d'un rota-vapeur sous vide modèle BUCHI R-210 à une température de 35°C et une pression de 200 mbar, pour éliminer les traces du solvant et concentrer l'échantillon jusqu'à un volume de 2 ml (Deymié, 1974 ; Bourgeois ,2003).

- **Dosage**

- Prélever 0,5 ml de l'extrait concentré
- Préparer le réactif en mélangeant :
 - 0,1 ml de Ferricyanure de potassium
 - 0,1 ml de Chlorure ferrique
 - 1,5 ml de Chloroforme.

- 8,5 ml d'éthanol
- A jouter 5 ml du réactif préparé
- Bien mélanger jusqu'à l'apparition d'une coloration brun acajou; il doit être employé immédiatement ou conservé à l'obscurité quelques minutes seulement.
- L'absorbance est déterminée à l'aide d'un Spectrophotomètre UV-visible à 510 nm pour le α -tocophérol et 450 nm pour le β -carotène.
- La teneur en α -tocophérol et en β -carotène est calculée en se référant à une gamme étalon (0 à 5 ppm) pour chaque vitamine (voir annexe 1).

4.2.4.5.1.2. Teneur en Acide ascorbique

- **Principe**

En milieu acide, la solution d'iodate de K (KIO_3) oxyde l'acide ascorbique (vitamine C) en acide oxyascorbique (adéhydroascorbique) (Bogdanski, 1965)

- **Réactifs**

- HCl à 2%
- Eau distillée
- Amidon à 0,5 %
- Iodure de potassium (KI) à 1 %
- Iodate de potassium (KIO_3) 1/1000N.

- **Mode opératoire:**

- Ajouter 50 ml de HCl à 10 g d'échantillon broyé.
- Après 10 min d'attaque acide, filtrer la solution puis compléter à 100 ml avec l'eau distillée.
- Prendre 10 ml d'extrait filtré et ajouter 30 ml d'eau distillée,
- ajouter 1 ml de la solution d'iodure de K et 2 ml de la solution d'amidon
- titrer à l'aide d'une solution d'iodate de K (KIO_3), jusqu'à un virage bleu qui dure quelques secondes
- Dans les mêmes conditions, on réalise un titrage d'un témoin
- la teneur en vitamine C est calculée selon la formule suivante :

$$TAA = \frac{(N - N') \cdot V_1 \cdot 0,0088}{P \cdot V_2} \times 100$$

Où :

TAA : teneur d'acide ascorbique en mg par 100 g de produit analysé (mg/100 g) ;

N : Nombre de ml d'iodate de K épuisé pour titrer l'échantillon

N' : Nombre de ml d'iodate de K épuisé pour titrer le témoin

V1 : Volume totale d'extrait obtenu pour l'analyse (100ml)

P : Quantité de produit à analysée (10g de fruit)

V2 : Volume d'extrait filtré soumis à l'analyse (10 ml)

4.2.4.5.2. Teneur en cendres (AFNOR NF V 05-113)

- **Principe**

L'échantillon à analyser est calciné à 550 ± 5 °C dans un four à moufle jusqu'à obtention d'une cendre blanchâtre

- **Mode opératoire**

- Dans des capsules en porcelaine peser 2 g de l'échantillon
- Placer les capsules au four à moufle et régler à 550 °C pendant 5 heures jusqu'à obtention d'une cendre blanchâtre
- Laisser refroidir au dessiccateur
- Peser les capsules contenant les cendres
- La teneur en matière organique MO est déterminée comme suit :

$$MO \% = \frac{M1-M2}{M1} \times 100$$

Où :

M1 : Masse en g d'échantillon avant l'incinération.

M2 : Masse en g d'échantillon après incinération

- La teneur en cendre est déterminée comme suit :

$$\text{Cendre \%} = 100 - MO\%$$

4.2.4.5.3. Teneur en éléments minéraux

Les cendres obtenues sont dissoutes dans un acide dilué et l'analyse se fait par la spectrophotométrie à flamme. La mesure de l'intensité lumineuse est faite à une longueur d'onde spécifique de l'élément à doser (Martin *et al.*, 1998).

- **Mode opératoire**

- Après minéralisation ajouter aux cendres obtenues (voir 4.2.4.5.2) 5 ml d'acide chlorhydrique (33%), mélanger légèrement, puis filtrer sur papier sans cendres
- Compléter à 50 ml avec l'eau distillé
- A partir de cette solution faire le dosage des éléments suivants : P, K, Ca, Na. à l'aide d'un spectrophotomètre à flamme, modèle JENWAY (voir annexe 1).

4.2.4.6. Mesure de la couleur

L'espace couleur $L^* a^* b^*$ (également appelé CIELAB) est actuellement l'un des plus populaires espaces pour mesurer la couleur de l'objet et est largement utilisé dans pratiquement tous les champs. C'est l'un des espaces de couleur uniformes définis par CIE en 1976.

- **Mode opératoire**

La couleur des rondelles de pomme a été déterminée à l'aide d'un chromamètre, type (KONICA MINOLTA CR-10) se référant à l'espace de couleur CIE $L^* a^* b^*$. Il n'y a pas de norme de la couleur pour la pomme sèche, donc les paramètres de la couleur de la pomme fraîche sont considérés comme référence (L_0, a_0 et b_0) (Aktas et al., 2008 ; Adam et al., 2013).

Selon Maskan (2000) et DjendobI (2012) et Alam et al., (2013). Le système $L^* a^*$ et vb^* est réalisé par les transformations suivantes : où, YI désigne la luminance visuelle de l'illuminant I.

$$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_1} \right)^{\frac{1}{3}} - 16$$

$$a^* = 500 \left(\frac{X}{X_1} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Y}{Y_1} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$b^* = 200 \left(\frac{Y}{Y_1} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Z}{Z_1} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$$

$$h^\circ = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right)$$

Où :

- L^* la clarté ou la luminosité
- a^* mesure le rapport rouge-vert
- b^* mesure le rapport jaune-bleue,
- C^* c'est la chroma, qui représente la saturation, varie de la couleur terne (faible valeur) à la couleur vive (haute valeur)
- h° représente l'angle de la teinte (Hue). Il varie entre 0° et 360° , l'origine correspondant à un rouge pourpre.

La différence de couleur totale (ΔE^*), différence de légèreté (ΔL^*), la différence (Δa^*) et la différence (Δb^*) étaient calculés selon les équations ci-dessous (Hasturk et al., 2011) comme :

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

Les valeurs ΔL^* , Δa^* et Δb^* contribuent au changement de couleur total

$$\Delta L^* - L^* - L_0^*, \Delta a^* - a^* - a_0^*, \Delta b^* - b^* - b_0^*$$

- $+\Delta L^*$ Signifie que l'échantillon est plus léger que le standard
- $-\Delta L^*$ Signifie que l'échantillon est plus sombre que le standard
- $+\Delta a^*$ Signifie que l'échantillon est plus rouge que le standard
- $-\Delta a^*$ Signifie que l'échantillon est plus vert que le standard
- $+\Delta b^*$ Signifie que l'échantillon est plus jaunissant que le standard
- $-\Delta b^*$ Signifie que l'échantillon est plus bleu que le standard.

Les points de couleur associés aux principaux illuminants A, B C et E sont placés sur le diagramme xy, sur la courbe des sources thermiques. On obtient ainsi, pour les différents illuminants normalisés (tableau 17).

Tableau 17 : Composantes trichromatiques normalisées.

E	X_E=100	Y_E=100	Z_E=100	x_E= 0.333	y_E= 0.333
A	X _A -109,85	Y _A -100	Z _A -35,58	x _A - 0.448	y _A - 0.407
C	X _C -98,07	Y _C -100	Z _C -118,23	x _c - 0.310	y _c - 0.316
D₆₅	X _{D65} -95,04	Y _{D65} -100	Z _{D65} -108,88	x _D - 0.313	y _D - 0.329

On définit le diagramme de chromacité XY comme le triangle dont les sommets sont formés par les primaires X, Y et Z. les coordonnées trichromatiques dans ce diagramme sont données par :

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}, \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

Qui vérifient la relation suivante :

$$x + y + z = 1$$

La figure 9 représente le cercle chromatique de l'espace des couleurs CIELab (ou Lab) et le diagramme de chromacité du système xy.

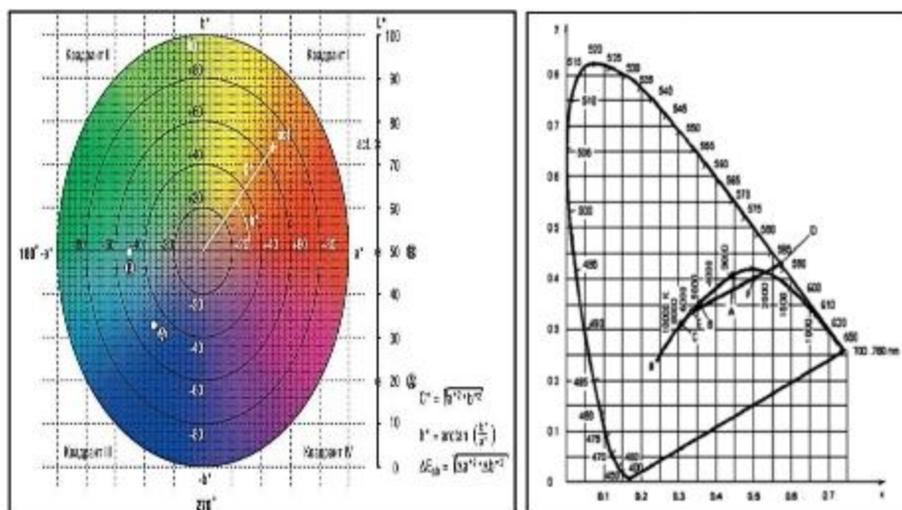


Figure 9 : Cercle et diagramme de chromacité et le diagramme de chromacité du système xy.

- **Détermination des indices BI, WI et YI**

L'indice de brunissement, BI, représente la pureté de la couleur brune dans la chair de la pomme en raison de l'activité enzymatique, ce qui peut causer changements délétères dans l'apparence et propriétés organoleptique et est donc considéré comme un paramètre important associé au brunissement d'échantillons (Jalae et al., 2011) :

$$BI = \frac{100}{0,17} \left(\frac{a^* + 1,75L^*}{5,645L^* + a^* - 3,012b^*} - 0,31 \right)$$

L'indice de blanchiment WI, c'est un indicateur de décoloration et de brunissement enzymatique (Pathare et al., 2013) :

$$WI = \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}}$$

Les indices de jaunissement sont principalement utilisés pour quantifier ces types de dégradation. L'indice de jaunissement (YI) indique le degré de jaunissement (Rhim et al. 1999) cités par (Pathare et al., 2013) :

$$YI = \frac{142,86 \times b^*}{L^*}$$

4.2.4.7. Caractéristiques phytochimiques

- **Préparation de l'extrait méthanolique de la pomme**

Pour préparer l'extrait méthanolique de la pomme, nous avons passé par les étapes suivantes (Fallah *et al.*, 2008) :

- Ajouter à 5 g de la pomme broyée, 50 ml de méthanol
- Laisser macérer à la température ambiante sous agitation magnétique pendant 30 min
- Stocker à 4°C pendant 24 heures
- Filtrer sur papier filtre
- Evaporer l'extrait dans un rotavapeur à 50 °C.

4.2.4.7.1. Teneur en polyphénols totaux

- **Principe**

Les polyphénols sont estimés par la méthode de Folin Ciocalteu (Singleton *et al.*, 1999). Ce Dosage repose sur le réactif de Folin Ciocalteu (couleur jaune) qui est constitué par un mélange d'acide phosphotungstique ($H_3PW_{12}O_{40}$) et acide phosphomolybdique ($H_2PM_{12}O_{40}$). Lorsque les polyphénols sont oxydés, ils réduisent le réactif Folin Ciocalteu en un complexe ayant une couleur bleue constitué d'oxyde de tungstène et de molybdène. L'intensité de la couleur est proportionnelle aux taux des composés phénoliques oxydés (Boizot et Charpentier, 2006).

- **Réactifs :**

- Méthanol
- Acide gallique
- Réactifs de Folin Ciocalteu's
- carbonate de sodium

- **Mode opératoire**

- Introduire 200 µl de l'extrait méthanolique de pomme dans les tubes à essai
- Ajouter 1ml de réactif de Folin Ciocalteu dilué 10 fois
- Ajouter 800 µl de la solution méthanolique de carbonate de sodium à 7,5%
- Incuber pendant 2 heures à température ambiante à l'abri de la lumière
- La lecture des absorbances est faite par spectrophotomètre UV-visible à 765 nm
- Les concentrations des polyphénols sont déduites à partir des gammes d'étalonnage établies avec l'acide gallique (0 à 50 µg EAG /ml) (Voire annexe 1).

4.2.4.7.2. Teneur en flavonoïdes

- **Principe**

L'estimation de la teneur en flavonoïdes contenus dans l'extrait méthanolique du fruit est réalisée par la méthode du trichlorure d'aluminium ($AlCl_3$) (Bahorun *et al.*, 1996). Les flavonoïdes possèdent un groupement hydroxyle (OH) libre, en position 5 qui est susceptible de donner avec le groupement CO, un complexe coloré avec le Chlorure d'aluminium (Boulckbache, 2005).

Les flavonoïdes forment des complexes jaunâtres par chélation des métaux (fer et aluminium). Ceci traduit le fait que le métal (Al) perd deux électrons pour s'unir à deux atomes d'oxygènes de la molécule phénolique agissant comme donneur d'électrons (Ribéreau-Gayon, 1972).

- **Réactifs :**

- Méthanol
- Quercétine
- Chlorure d'aluminium ($AlCl_3$)

- **Mode opératoire**

- Introduire 1ml de l'extrait méthanolique de pomme dans les tubes à essai
- Ajouter 1 ml de la solution méthanolique d' $AlCl_3$ à 2 %.
- Après 10 min d'incubation, l'absorbance est lue à 430 nm.
- Les concentrations des flavonoïdes sont déduites à partir de la gamme d'étalonnage établies avec la Quercétine (0 à 25 μg EQ /ml) (Voir annexe 1).

4.2.4.7.3. Evaluation de l'activité antioxydante (Test de piégeage du radical libre DPPH)

Pour étudier l'activité antioxydante de l'extrait méthanolique de la pomme, la méthode repose sur l'utilisation de DPPH (2,2 diphenyl-1- picrylhydrazyl) comme un radical libre relativement stable.

- **Principe**

L'activité antioxydante est évaluée par la mesure du pouvoir de piégeage du radical DPPH. La méthode est basée sur la dégradation du radical DPPH : un antioxydant aura la capacité de donner un électron au radical synthétique "DPPH" de coloration violette pour le stabiliser en DPPH de coloration jaune-verte. Le résultat est dépendant de la concentration en DPPH initial (Villano *et al.*, 2007).

- **Réactifs :**

- Méthanol
- DPPH

- **Mode opératoire**

Le protocole expérimental est celui décrit par Mansouri *et al.* (2004) ;

- Introduire 50 µl de chaque échantillon dans les tubes à essais
- Ajouter 1,95 ml de la solution de DPPH (0,2 mol/L)
- Laisser le mélange à l'obscurité pendant 30 minutes
- Le contrôle est préparé de la même façon
- La lecture se fait dans un spectrophotomètre UV-visible à 517 nm
- L'activité anti radicalaire est estimée selon l'équation suivante (Lu *et al.*, 2011).

$$\text{Activité antiradicalaire \%} = \frac{(\text{Abs}_{517} \text{ DPPH} - \text{Abs}_{517} \text{ échantillon})}{\text{Abs}_{517} \text{ DPPH}} \times 100$$

4.2.5. Détermination des propriétés fonctionnelles de la pomme fraîche et la pomme séchée

4.2.5.1. Propriétés d'hydratation

4.2.5.1.1. La capacité d'absorption d'eau et d'huile

- **Principe**

La capacité de rétention d'eau (CRE) est définie comme étant la quantité d'eau fixée par un gramme de fibre sous les conditions de température, le temps d'agitation, la vitesse et le temps de centrifugation décrits. La capacité de fixer l'huile (CRH) est définie comme étant la quantité d'huile fixée par les fibres après mélange, incubation dans l'huile et centrifugation (Caprez *et al.*, 1986)

- **Mode opératoire**

La méthode de Phillips *et al.*(1988) est utilisée pour la détermination de pouvoir absorbant de l'eau et d'huile :

- 1g de la pomme broyée est mélangé à 10 ml d'eau distillée /huile
- L'ensemble est agité pendant 30 secondes par un agitateur
- En suite centrifuger à 4500 tr/min pendant 30 minutes
- Après la centrifugation on élimine le surnageant
- Le culot est séché dans une étuve à 105 C° pendant 30 min, puis pesé
- La capacité d'absorption d'eau (CAE) et d'huile (CAH) sont déterminé par la formule suivante et exprimé en pourcentage :

$$\text{CAE \%} = \frac{\text{PF}-\text{PI}}{\text{PI}} \times 100$$

$$\text{CAH \%} = \frac{\text{PF}-\text{PI}}{\text{PI}} \times 100$$

Où

P_f : poids de culot après séchage.

P_i : poids initiale de l'échantillon.

4.2.5.1.2. La solubilité

- **Principe**

La solubilité dans l'eau gouverne leur classification en solubles/insolubles. Elle repose sur la présence de très nombreuses fonctions hydrophile capables d'interagir avec l'eau. Cette solubilité est en fonction du pH, de la force ionique et de la température du milieu (Roudot, 2002).

- **Mode opératoire**

Les mesures des capacités de rétention d'eau et d'huile sont effectuées selon la méthode de Fernandez-Kim (2004) :

- Peser 0,1 g d'échantillon et ajouter 10 ml d'acide acétique à 1%
- Mélanger bien dans un agitateur Vortex pendant 30 min
- Chauffer à 100°C dans un bain marie pendant 10 min, puis refroidir à la température ambiante 25°C
- Centrifuger à 10000 tr/min pendant 10 min, récupérer le surnageant;
- Rincer le culot par l'addition de 25 ml d'eau distillé, puis centrifuge à 10000 Tour/min pendant 10 min
- Récupérer et sécher le culot à l'étuve ventilée à 60 C° pendant 24 h.
- La solubilité est calculé pare la formule suivante :

$$\text{solubilité \%} = \frac{PF - PI}{PI} \times 100$$

Où

P_i : poids initiale de l'échantillon.

P_f : poids de culot après séchage.

4.2.5.1.3. Viscosité

- **Principe**

Les molécules du liquide peuvent être attirées plus ou moins fortement entre elles, et être également liées avec plus ou moins d'autres molécules. Plus les molécules seront liées entre elles, moins elles arriveront à se déplacer les unes par rapport aux autres, et ainsi, la viscosité sera importante. La viscosité représente alors la résistance du fluide à l'écoulement (Couarraze et Grossiord, 2000)

- **Mode opératoire**

- Préparer la dispersion de la pomme broyée dans l'eau distillée à différents concentrations de 8, 12, 16 et 20 %, filtrer les solutions

- Mettre la solution préparée dans le tube d'un viscosimètre à bille (annexe 2).
- Laisser tomber la bille dans le tube contenant la solution et déclencher le chronomètre
- Noter le temps de passage (t) (le temps de la chute de la bille).
- La vitesse de chute de la bille est alors inversement proportionnelle à la viscosité, la viscosité est donnée par l'expression suivante

$$\rho = k(\sigma_s - \sigma)t$$

Où

- ρ : viscosité en Pa.s
- σ_s : densité de la bille utilisée, elle est 16.6
- σ : densité du produit analysé
- t : temps de chute (min)
- k : constante liée à l'appareil,

4.2.5.2. Propriété de surface

4.2.5.2.1. Capacité émulsifiante et stabilité des émulsions

• Principe

Les émulsifiants sont des substances qui sont ajoutées à une denrée alimentaire pour réaliser ou maintenir le mélange homogène de deux ou plusieurs phases non miscibles telles que l'eau et l'huile. Ces substances sont des composés amphiphiles dont la structure chimique comporte à la fois des fonctions hydrophiles et les fonctions hydrophobes (Multon, 2002).

• Mode opératoire

L'activité et la stabilité d'émulsifiant est déterminées par la méthode de Neto et *al.*, (2001) citer par Adebowale et Lawal (2004) et Acuna et *al.* (2010).

- Prélever 5 ml de la solution préparée à partir de 1g de la pomme broyée dans 100 ml d'eau distillée (10 mg/ml) ;
- Homogénéiser avec 5 ml d'huile pendant 1 minute dans un agitateur modèle IKA T25 digital ULTRA TURRAX
- L'émulsion est centrifugée à 1100 tour/min pendant 5 minutes ;
- La taille d'une couche émulsionnée et de celle du contenu total dans le tube a été mesurée.
- Capacité émulsifiante est calculée par la formule suivante :

$$\text{Capacité émulsifiante \%} = \frac{\text{Hauteur de la couche d'émulsion dans le tube (cm)}}{\text{Hauteur de tout le contenu dans le tube (cm)}} \times 100$$

- La stabilité d'émulsion a été déterminée en chauffant l'émulsion à 80°C pendant 30 min avant la centrifugation à 1100 tour/min pendant 5 minutes. La stabilité d'émulsion est déterminée par la formule suivante :

$$\text{Stabilité d'émulsion \%} = \frac{\text{Hauteur de la couche d'émulsion après chauffage et centrifugation (cm)}}{\text{Hauteur d'une couche émulsionnée avant le chauffage (cm)}} \times 100$$

4.2.5.2.2. Capacité moussante

- **Principe**

Les propriétés moussantes (foisonnement) sont expliquées par la dispersion d'un gaz dans un liquide riche en protéine. Le foisonnement est défini comme l'augmentation de volume (Marlène et Vierling, 2001).

- **Mode opératoire**

La capacité et la stabilité moussante ont été étudiées par la méthode de Coffman et Garcia (1977) :

- Un poids connu de l'échantillon était dispersé dans 100 ml l'eau distillée
- La solution résultante a été homogénéisée pendant 5 minutes à grande vitesse à l'aide d'un mixeur
- Le pourcentage de l'évolution de volume est calculé par la formule suivante :

$$\text{Capacité moussante \%} = \frac{\text{Volume après homogénéisation} - \text{Volume avant l'homogénéisation}}{\text{volume avant l'homogénéisation}} \times 100$$

4.2.5.3. Propriété de structuration

4.2.5.3.1. Capacité gélifiante

- **Principe**

Un gel peut être défini comme un système au moins biphasique ou constitué par un réseau de macromolécules tridimensionnel solide retenant entre ses mailles la phase liquide (Marlène et Vierling, 2001).

- **Mode opératoire**

La propriété de gélification est déterminée selon la méthode décrite par Coffman et Garcia (1977).

- Préparer la dispersion de la pomme broyée dans l'eau distillée à différentes concentrations 2, 4, 8, 12, 16 et 20 %
- Prélever 10 ml de dispersion préparée pour chaque concentration
- chauffer dans un bain marie à 40 °C pendant 1 heure.

- Refroidir les tubes dans un réfrigérateur à 4 C° pendant 2 heures.
- Capacité gélifiante est déterminée par la formule suivante :

$$\text{Capacité gélifiante \%} = \frac{\text{Hauteur de la couche gélifiée dans le tube (cm)}}{\text{Hauteur de tout le contenu dans le tube (cm)}} \times 100$$

4.2.5.4. Densité

- **Principe**

On entend par densité le rapport entre la masse volumique (masse d'une unité de volume) d'une substance et la masse volumique (masse de la même unité de volume) d'une substance de référence (Manual of Weighing Applications, 2016).

- **Mode opératoire**

- La densité est déterminée par une balance RADWAG AS 220. R2, à 24°C.
- La densité est lue directement sur l'afficheur de la balance après déposer une quantité de pomme dans le dispositif spécifique de la densité (annexe 2).

4.2.6. Analyse statistique

Nous avons réalisé six répétitions pour chaque paramètre et nous avons déterminé la moyenne et l'écart type.

L'analyse statistique des résultats a été réalisée à l'aide du logiciel XLStat version 2016.02.28451. L'hypothèse d'égalité des moyennes a été testée par analyse de variance ANOVA. Les moyennes significativement différentes est comparées par la méthode de Newman et Keuls au seuil $P < 0,05$. Les résultats obtenus sont traités par le test de corrélation (test de Pearson) et l'analyse factorielle des correspondance (AFC), cela permet de visualiser les relations entre les paramètres de séchage et les caractéristiques physicochimiques et les propriétés fonctionnelles de la pomme.

La modélisation de la cinétique de séchage est réalisée par le logiciel SigmaPlot V. 11.

- **L'analyse factorielle des Correspondances (AFC)**

C'est une technique rigoureuse mathématiquement et les résultats sont donnés sous forme d'une représentation graphique (ou diagramme), leur interprétation n'obéit pas à une recette bien définie. Néanmoins, quelques observations sont susceptibles d'aider à l'interprétation des résultats (Aboubakry, 1975 ; Foucart, 1985).

- Notons deux individus ou deux variables se rassemblent d'autant plus qu'ils sont proches l'un de l'autre.
- Les caractères peu sélectifs sont regroupés au centre du diagramme.

- Plus un point se situe à droite sur le graphique, plus il s'écarte de la moyenne par de fortes valeurs de caractères.
- Les points situés à gauche du graphique correspondent évidemment au phénomène inverse.
- D'une façon générale les positions opposées des caractères déterminent l'opposition entre eux.

Chapitre 5 :

Résultats et discussion

5.1. Détermination des paramètres physiques de la pomme

Les paramètres morphologiques sont mentionnés dans le tableau 18 et sont déterminée sur une dizaine de pommes.

Tableau 18 : Paramètres morphologiques de la pomme.

Caractéristiques morphologiques	
Largeur de la pomme (mm)	64,03 ± 9,39
Hauteur de la pomme (mm)	59,49 ± 8,93
Poids de la pomme entière (g)	136,71 ± 5,06
Poids partie non comestible (pépin + pédoncule) (g)	0,65 ± 0,09
Poids partie comestible (peau et chaire) (g)	129,40 ± 11,13
Rendement par rapport à la partie comestible (%)	94,66

D'après le tableau 22, les propriétés physiques nous permettent de présenter la pomme étudiée, d'avoir une idée sur la forme et les dimensions du fruit. Ces caractéristiques varient selon les conditions climatiques, édaphiques et les techniques culturales appliquées. Le poids moyen de la pomme entière est de 136,71g. Cette valeur coïncide avec celle citée par Simmonds et Howes (2016) qui signalent que le fruit de pomme mûrit à la fin de l'été à l'automne, est d'un poids moyen de 100 à 300 g.

Le rendement nous permet de connaître l'intérêt économique pour son utilisation industrielle, dans notre cas le rendement de la pomme étudiée représente un pourcentage très intéressant qui est équivalent à 94,66 %.

5.2. Détermination de la teneur en matière sèche et la teneur en eau

Les résultats de la teneur en eau et en matière sèche de la pomme sont illustrés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 19 : Teneur en eau et en matière sèche de la pomme *Golden delicious*.

	Teneur en eau (%)	Teneur en matière sèche (%)
Pomme (<i>Golden delicious</i>)	84,87 ± 0,89	15,13 ± 0,80

La teneur en eau nous permet d'une part d'exprimer les résultats de la matière sèche par rapport au poids total et d'autre part d'exprimer les résultats des constituants biochimiques par rapport à la matière sèche.

Le tableau 19 montre que la variété *Golden delicious* jaune renferme 84,87% d'eau et 15,13% de matière sèche. Ces résultats sont très proches des valeurs données par Lacoste

(2008), qui signale que la pomme contient plus de 80 %, et sont identiques à ceux trouvés par Demigné et *al.* (2003), qui apportent une teneur de 84,30 % d'eau et 15,70 % de la matière sèche pour une étude faite sur *Golden délicious* jaune.

La teneur en eau des fruits est variable, en effet elle dépend de la variété et des conditions climatiques. La pomme fraîche peut être conservée dans la chambre froide pour une période limitée de 2 à 3 mois. Pour augmenter la période de conservation, il faut abaisser cette forte teneur en eau, dans ce cas le séchage est une alternative intéressante.

5.3. Séchage de la pomme

5.3.1. Etude de la cinétique de séchage

La Figure 10, représente l'évolution de l'humidité en fonction du temps de séchage de pomme par microonde à différentes puissances (100, 180, 300, 450, 600 et 900W). Et la figure 11 illustre l'évolution de l'humidité en fonction du temps de séchage de pomme à l'étuve sous vide en fonction du temps à une pression constante de 200 mbar couplée à différentes températures (45, 55 et 65°C).

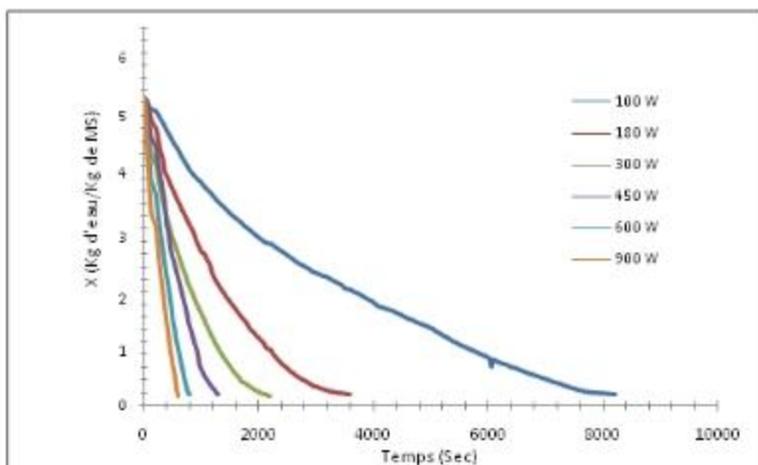


Figure 10 : Evolution de la teneur en eau X (kg d'eau/kg de matière sèche) en fonction du temps (Sec) pour la pomme séchée par microonde

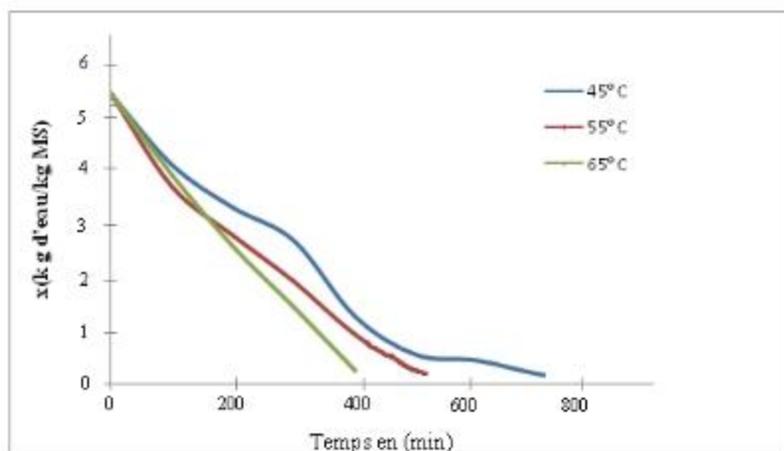


Figure 11 : Evolution de la teneur en eau X (kg d'eau/kg MS) en fonction du temps (min) pour la pomme séchée dans une étuve sous vide à 200 mbar

Tableau 20 : Temps de séchage et l'énergie consommée pour les deux méthodes de séchage de la pomme

Temps de séchage et l'énergie consommée		
Séchage par micro-onde		
Puissance en (Watts)	Temps de séchage en (min)	Consommation d'énergie (kWh)
100W	136,00 ^d	0,226 ^d
180W	57,50 ^e	0,172 ^e
300W	34,50 ^f	0,175 ^e
450W	19,50 ^g	0,146 ^{cd}
600W	11,50 ^h	0,115 ^f
900W	8,50 ⁱ	0,127 ^f
Séchage à l'étuve sous vide à 200 mbar		
Température en (°C)	Temps de séchage en (min)	Consommation d'énergie (kWh)
45°C	616 ^a	8,21 ^a
55°C	464 ^b	6,18 ^b
65°C	360 ^c	4,80 ^c

Dans chaque colonne, Les moyennes suivies d'une lettre différente sont significativement différentes au seuil de $p < 0,05$ d'après le test de Newman et Keuls.

En Générale, la cinétique de séchage pour les deux procédés est similaire à la bibliographie (Bimbenet 1984 ; Mafart 1996). On remarque des courbes régulièrement décroissantes (Figure 13 et 14). Selon Cheftel *et al.* (1979) cette diminution correspond à l'élimination d'eau libre.

Rappelons que le séchage est achevé jusqu'à une teneur en eau de $0,26 \pm 0,03$ (Kg d'eau/Kg de matière sèche), pour tous les paramètres de séchage.

- **Concernant le séchage par microonde**

Le temps de séchage diminue avec l'augmentation de la puissance par micro-onde (tableau 20). La puissance de 900 W présente le temps le plus court (10 min).

Les caractéristiques de séchage sont également influencées par le diélectrique du matériel (facteur de perte) et par les propriétés thermiques de l'eau (La chaleur latente de la vaporisation, point d'ébullition).

L'influence de la puissance sur la cinétique de séchage est remarquable. Dans tous les cas une augmentation de la puissance se traduit par une diminution du temps de séchage.

De même, l'énergie consommée est inversement proportionnelle à la puissance. L'énergie consommée pour le séchage à 900 W est égale à 0,172 kWh, alors que l'énergie consommée à 100 W est plus importante 0,226 kWh.

Ces résultats sont similaires à ceux trouvés par Hassan Abou Elhana (2008), qui a étudié la cinétique de séchage de la pomme (variété canadienne *Scian Gold*) par microonde à deux puissances 100 et 200 W. Cet auteur révèle que l'humidité passe de 1 à 1,8 (Kg d'eau/Kg de matière sèche) pendant 5 min et ceci à 100 W et de 1 à 1,2 (Kg d'eau/Kg de matière sèche) pendant 3,5 min pour une puissance de 200 W. Ces résultats montrent la rapidité du procédé et l'impact de la puissance sur le temps de séchage.

- **Concernant le séchage à l'étuve sous vide**

D'une manière générale la déshydratation thermique sous vide est appliquée à fin de diminuer la température d'ébullition d'eau et par conséquence, le temps et la température de séchage vont être réduits, ce qui est bénéfique de point de vue économique et qualité.

Pour les trois couples de séchage appliqués dans la présente étude, le temps de séchage est extrêmement long, parce que le cassage et la mise en vide épuise un temps pour chaque prise de poids.

En tenant compte que le vide appliqué est le même pour les trois couples (variable constante), l'influence de la température sur la cinétique de séchage est remarquable, l'augmentation de la température est inversement proportionnelle à la teneur en eau et à l'énergie consommée. Sous la température de 65°C on enregistre le temps le plus court (360 min) avec une consommation d'énergie de 4,8 kWh, suivie par une température 55°C (464 min) avec une consommation d'énergie de 6,18 kWh et en dernier lieu sous une température de 45 °C (on enregistre 616 min) avec une consommation d'énergie la plus élevée équivalente à 8,21 kWh.

La même allure de séchage sous vide est rapportée par Lavelli et Corti (2011), ces auteurs signalent un temps de séchage de 960 min pour le séchage sous vide à 40°C des marcs de pomme (*Golden delicious*), en passant d'une humidité de 1,67 à 0,025 (kg d'eau/ Kg de matière sèche).

En comparant les deux techniques de séchage appliquées dans ce travail, on observe que le temps de séchage et l'énergie consommée pour le séchage par microonde sont nettement inférieurs à ceux issus de séchage à l'étuve sous vide. Ceci a certainement un impact sur l'aspect économique. Bernard (1995) montre que la durée et le coût de séchage déterminent le choix du procédé et du matériel utilisé.

Pour les deux techniques de séchage appliquées, la corrélation positive entre la diminution du temps de séchage, l'augmentation de la puissance et la température est expliquée par l'augmentation de transfert de la matière (eau) et la chaleur, où la différence de la pression de la vapeur entre le centre et la surface du produit devient plus importante.

Dans une étude similaire, Haruz et al. (2017) montrent que l'énergie consommée pour le séchage des cerises par séchage combiné au microonde (120, 150 et 180 W / 50, 60 et 70°C) varie de 1,63 à 5, 21 kWh ; ces valeurs sont inférieures à celles trouvées par le séchage par convention (50, 60 et 70 °C) qui varie de 5,5 à 14,57 kWh.

5. 3.2. Modélisation de la cinétique du séchage

Dans ce travail, la cinétique de séchage est modélisée par deux modèles mathématiques (Logarithmique et Two-Term). Les figures 12 et 13 illustrent les résultats obtenus. Les valeurs calculées des paramètres statistiques utilisés sont reportées dans les tableaux 24 - 27.

Les deux modèles sont comparés en s'appuyant sur les valeurs du coefficient de détermination (R^2), du ki-carré réduit (χ^2) et de la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Dans les conditions expérimentales étudiées, ces valeurs varient respectivement de 0,966 à 0,999 ; de 0,002 à 161,39 et de 0,00023 à 0,039 pour le séchage par microonde et de 0,969 à 0,999 ; de $2,58 \times 10^{-6}$ à $7,68 \times 10^{-2}$ et de $4,37 \times 10^{-4}$ à $7,54 \times 10^{-2}$.

Les valeurs élevées de R^2 et les faibles valeurs de χ^2 et RMSE pour les modèles : logarithmique et Two-Term indiquent une bonne cohérence entre ces modèles et les résultats expérimentaux. D'après le tableau 21 le modèle logarithmique est le plus adéquat pour décrire et présenter les données expérimentales de séchage de la pomme par microonde et à l'étuves sous vide. Chong et al.(2014) révèlent que le modèle logarithmique est le plus souhaitable pour exprimer les données de séchage des cubes de pomme (Variété *Royal gala*).

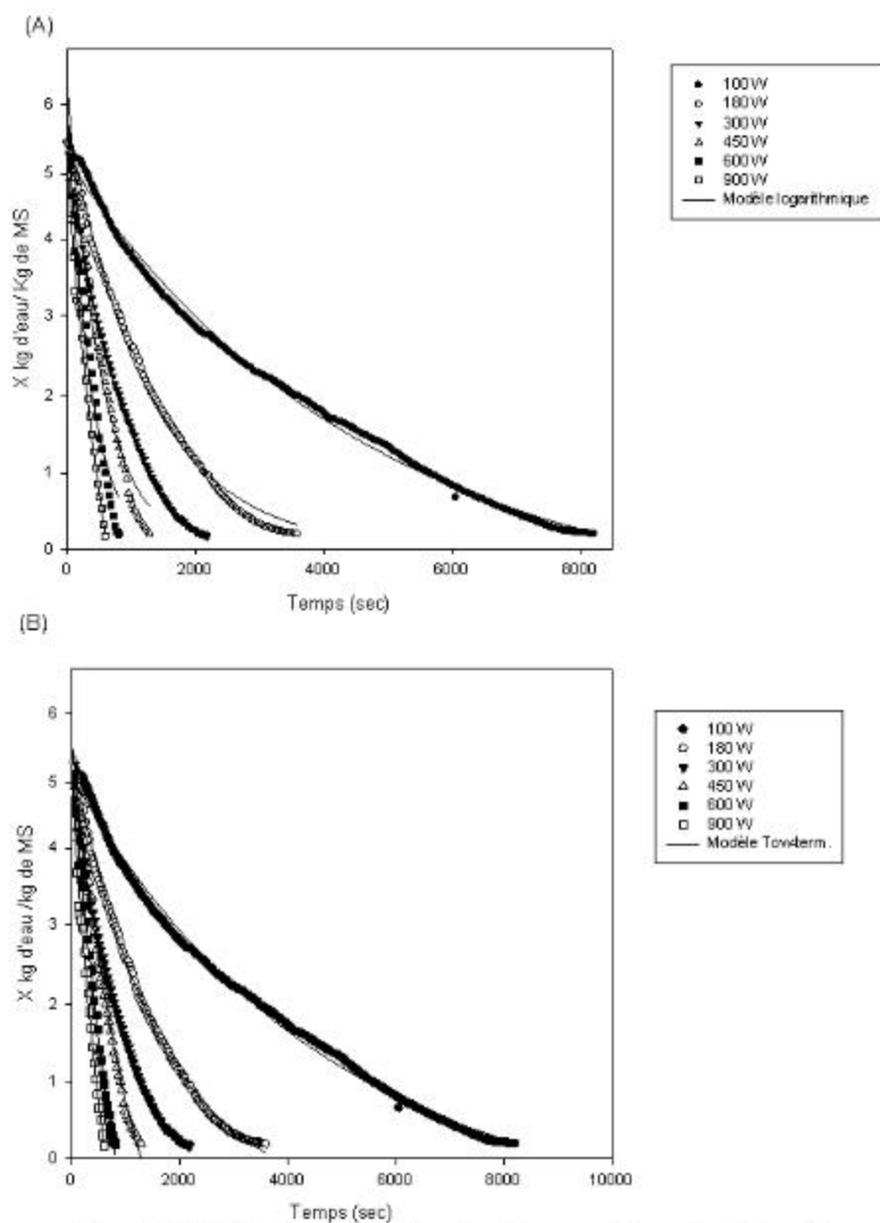


Figure 12: Modélisation de la cinétique du séchage par microonde : (A) modèle logarithmique (B) modèle Tow-Term.

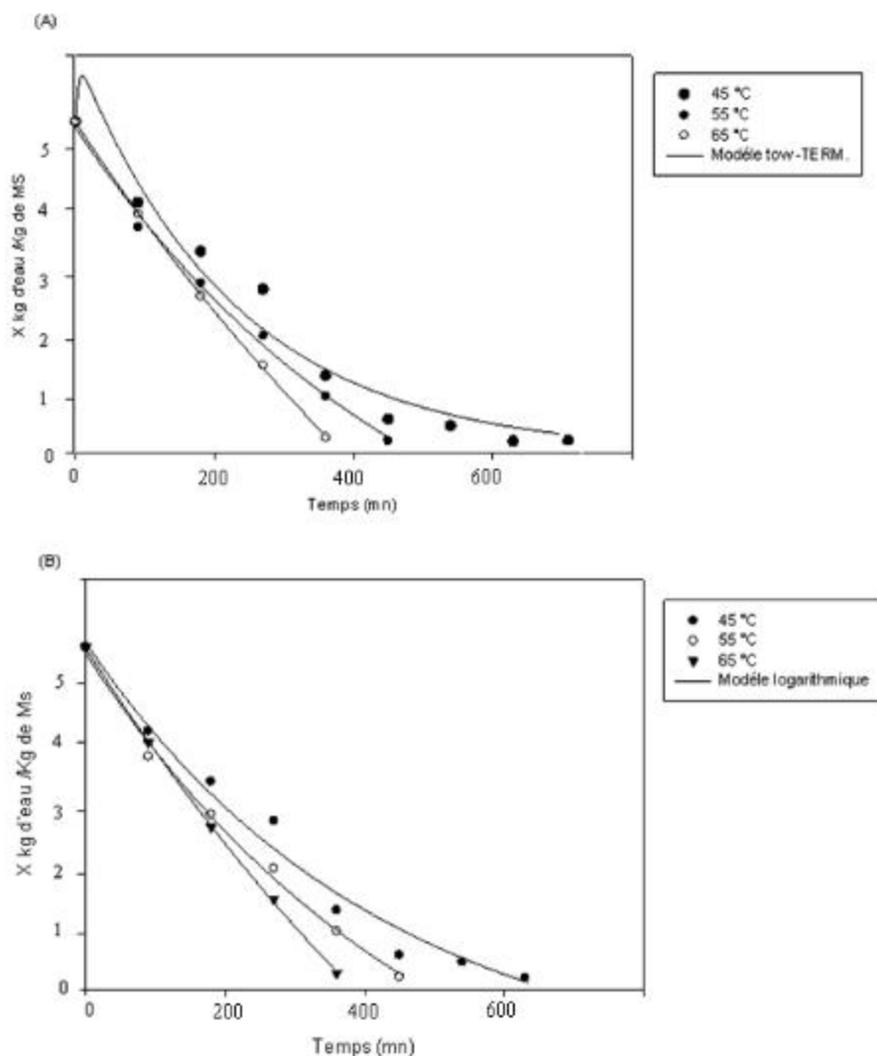


Figure 13: Modélisation de cinétique du séchage sous vide à 200 mbar : (A) modèle Tow-term et (B) modèle logarithmique.

Tableau 21: Paramètres des deux modèles appliqués pour le séchage par microonde

Modèle de Tow-Term	Puissance (w)	k'	b	a	k	R ²	D _{eff}	X ²	RMSE
	100	4,48E-14	-0,748	5,43	2,13E-04	0,995	1,38E-09	0,075	0,00026
180	1,759	-0,278	5,16	0,003	0,993	1,14E-05	10,04	0,00679	
300	4,77E-4	-2,20	6,967	8,84E-04	0,999	8,83E-09	54,60	0,02561	
450	2,542	-0,735	5,618	0,002	0,973	1,65E-05	28,83	0,03262	
600	4,55	-0,397	5,279	7,95E-04	0,966	2,90E-05	15,65	0,03854	
900	7,907E-13	-3,148	7,813	0,001	0,991	6,00E-09	161,39	0,00202	
Modèle Logarithmique	Puissance (w)	/	c	a	k	R ²	D _{eff}	X ²	RMSE
	100	/	-0,748	5,43	2,13E-04	0,995	1,38E-09	0,07486	0,00026
180	/	-0,515	5,46	6,18E-04	0,999	4,01E-09	0,01138	0,00023	
300	/	-0,466	5,24	0,001	0,999	6,00E-09	10,06582	0,01130	
450	/	-2,43	7,54	8,8E-04	0,995	5,70E-09	0,00390	0,00037	
600	/	-4,25	9,04	9,16E-04	0,996	5,95E-09	0,00201	0,00042	
900	/	-3,148	7,813	0,001	0,991	6,00E-09	161,39	0,00202	

Tableau 22: Paramètres des deux modèles appliqués pour le séchage à l'étuve sous vide

Modèle de Tow-Term	Paramètres	K'	b	a	k	R ²	D _{eff}	X ²	RMSE
	45°C/200mbar	8,011E-12	-0,205	1,205	0,109	0,969	7,07E-07	1,05E-02	1,72E-02
55°C/200mbar	2,329E-11	-0,593	1,57	0,200	0,995	1,20E-06	5,11E-04	5,43E-03	
65°C/200mbar	2,672E-11	-1,905	2,90	0,234	0,999	2,81E-06	2,58E-06	4,37E-04	
Modèle Logarithmique	Paramètres	/	c	a	k	R ²	D _{eff}	X ²	RMSE
	45°C/200mbar	/	-0,266	1,28	0,109	0,982	7,07E-07	5,40E-05	1,17E-03
55°C/200mbar	/	-0,59	1,57	0,20	0,995	1,29E-06	4,86E-06	5,29E-04	
65°C/200mbar	/	-1,95	2,90	0,235	0,999	1,52E-06	7,68E-02	7,54E-02	

Les chiffres en gras représentent les meilleures valeurs trouvées en comparant les deux modèles (en se basant sur Les valeurs élevées de R² et les faibles valeurs de χ^2 et celles des RMSE).

L'utilisation de ces modèles permet de déterminer la diffusivité effective (D_{eff}) en fonction des conditions expérimentales choisies (annexe 3). Les résultats obtenus attestent que ce paramètre varie entre $1,38 \times 10^{-9}$ à $2,90 \times 10^{-5}$ m²/s pour le cas de séchage par microonde et de $7,07 \times 10^{-7}$ à $1,52 \times 10^{-6}$ m²/s pour le cas de séchage sous vide. Ces résultats sont comparables à ceux trouvés par Chong et al. (2014) qui signalent une diffusivité qui s'étale de $1,43 \times 10^{-6}$ à $5,78 \times 10^{-5}$ m²/s. pour la pomme (Royal Gala) en cube de 15 mm d'arrêté séchée par microonde-sous vide,..... . De même Aghilinategh et al. (2015) (D_{eff}) est de $1,58 \times 10^{-6}$ à $9,47 \times 10^{-6}$ m/s pour le séchage des rondelles de pomme (Red delicious) à 6 mm d'épaisseur par séchage à l'air chaud et séchage par microonde

Les résultats obtenus montrent que la diffusivité augmente avec l'augmentation de la puissance pour le séchage par microonde, comme elle augmente avec la température pour le séchage sous vide. la diffusivité la plus élevée est observée à la puissance 600 W ($2,90 \times 10^{-5}$ m²/s), les mêmes observations sont signalées par Aghilinategh et al.(2015), où la diffusivité la plus élevée est accordée à la puissance 600 W (2×10^{-8} m²/s).

5.4. Détermination des propriétés physico-chimiques

5.4.1. pH

Les résultats de pH de la pomme fraîche et séchée sont mentionnés dans le tableau 23.

Tableau 23 : Le pH de la pomme fraîche et séchée.

Paramètre	pH
Pomme fraîche	4,01±0,01 ^b
Séchage par micro-onde	
Puissance (W)	Moyenne ± Ecart type
100	3,94±0,01 ^b
180	3,97±0,03 ^b
300	3,94±0,01 ^b
450	3,94±0,03 ^b
600	3,92±0,02 ^b
900	3,92±0,02 ^b
Séchage à l'étuve sous vide à 200 mbar	
Température (°C)	Moyenne ± Ecart type
45	4,58±0,03 ^a
55	4,67±0,02 ^a
65	4,2±0,03 ^{ab}

Les moyennes suivies d'une lettre différente sont significativement différentes au seul de $p < 0,05$ d'après le test de Newman et Keuls.

Le tableau 23 représente le pH de la pomme séchée par microonde à différentes puissances (100, 180, 300, 450, 600 et 900 W) et dans l'étuve sous vide à 200 mbar à différentes températures (45, 55 et 65 °C)

Généralement, le pH enregistré est acide et varie de 4 à 5, ceci est expliqué par la présence des acides organiques libres dans la pomme (0,2 à 0,6 %) ; comme l'acide citrique et l'acide malique (Kaushal et Sharma, 1995).

Ces résultats trouvés sont conformes aux valeurs données par Espiard (2002), qui indique que le pH de pomme de table est de 4 à 5.

Selon la bibliographie, ce paramètre influe sur les propriétés fonctionnelles et biochimiques (Cheftel *et al.*, 1979), ce qui explique l'importance de sa détermination.

Selon les résultats du tableau ci-dessus il n'existe pas une différence significative entre le pH de la pomme fraîche et celle séchée par microonde à différentes puissances, par contre on observe une différence significative par rapport au séchage à l'étuve sous vide à différentes températures. Ceci nous permet de déduire

que le séchage par microonde n'influe pas sur le pH contrairement au séchage dans l'étuve sous vide, ce dernier provoque une augmentation de pH. Cette augmentation de pH peut être la conséquence de la diminution de la concentration en H_3O^+ (avec $pH = -\log [H_3O^+]$). Probablement ceci est dû à leur participation à certaines réactions, ou à la formation des composés alcalins pendant le séchage.

Le fait que le pH dépende de l'activité des ions hydrogènes induit qu'il dépend de plusieurs autres facteurs, tels que l'influence du solvant, la température ou la pression. Plus couramment, le pH mesure l'acidité ou la basicité d'une solution

Le pH est un facteur critique pour la stabilité microbiologique du produit et doit toujours être vérifié. Les aliments entreposés à température ambiante, le pH peut s'avérer un facteur critique pour en assurer l'innocuité.

Les aliments très acides ont un pH de 4,6 ou moins. Un tel pH ne permet pas la croissance de bactéries pathogènes (innocuité) et ne favorise pas les réactions chimiques (qualité). Habituellement, ces aliments requièrent peu de traitements car leur faible pH en assure l'innocuité. La plupart des fruits et produits de fruits sont des aliments très acides (ACIA, 2009)

5.4.2. Acidité titrable

L'acidité titrable donne la mesure de tous les acides d'un aliment. Les acides existent sous deux formes dans les produits alimentaires : sous forme d'ions libres ou sous forme d'ions constitutifs des systèmes tampons. En ajoutant une base forte à l'échantillon, on neutralise les ions libres. Le système tampon libère plus d'ions hydrogène pour compenser et maintenir un certain pH. À mesure qu'on poursuit la titration, le pouvoir tampon s'épuise et tout l'acide du produit réagit avec la base forte. Si on connaît la force de la base et la quantité utilisée, on peut calculer la quantité totale d'acide dans le produit, soit l'acidité totale titrable.

Les résultats de l'acidité titrable de la pomme fraîche et séchée sont regroupés dans le tableau 24.

Tableau 24 : Acidité titrable de la pomme fraîche et séchée.

Acidité titrable (% MS)	
Pomme fraîche	1,91±0,016 ^a
Séchage ge par micro-onde	
Puissance (W)	
100	0,45 ± 0,00 ^c
180	0,45 ± 0,01 ^c
300	0,46 ± 0,00 ^c
450	0,49 ± 0,01 ^b
600	0,48 ± 0,02 ^b
900	0,50 ± 0,03 ^b
Séchage à l'étuve sous vide à 200 mbar	
Température (°C)	
45	0,26 ± 0,02 ^c
55	0,26 ± 0,01 ^c
65	0,29 ± 0,00 ^d

Les moyennes suivies d'une lettre différente sont significativement différentes au seuil de $p < 0,05$ d'après le test de Newman et Keuls.

Selon les résultats obtenus l'acidité titrable de pomme fraîche est 1,91 % MS correspondant à 0,29 % MF. Ce résultat est similaire à celui signalé par Nour et *al.* (2010) qui indique une valeur de 0,30 % MF d'acidité titrable pour la même variété étudiée. De plus, Lakaushal et Sharma (1995) montrent que L'acidité titrable de la pomme dans ses différentes variétés varie entre 0,22 et 0,78 % MS.

D'après le tableau 24, une diminution de l'acidité titrable est observée pour la pomme séchée pour les deux modes de séchage, ce qui illustre l'effet de la déshydratation appliquée sur ce paramètre. Les plus faibles valeurs de l'acidité titrable sont correspondant à la pomme séchée à l'étuve sous vide 45, 55°C (0,26 % MS), sans différence significatives. La pomme séchée par microonde préserve mieux le taux de l'acidité titrable, surtout pour les fortes puissances 450, 600 et 900 W (0,49, 0,48 et 0,50 % MS respectivement).

Spatariu et *al.* (2006) ont observé une diminution de l'acidité titrable de la pomme hollandaise (*Golden delicious*) après séchage à l'étuve à 40°C pendant 8 heures, allant d'une teneur de 1,17 % MS à 0,59 % MS pour la pomme fraîche et séchée respectivement.

Dans les produits transformés, l'acidité titrable est une indication de la qualité plutôt que de l'innocuité du produit. Dans le jus de pommes, la quantité d'acide équilibre la teneur en sucre (goût sucré), sans que le jus soit excessivement acidulé (ACIA, 2009).

5.4.3. Teneur en protéines

Les résultats de la teneur en protéines de la pomme fraîche et séchée sont regroupés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 25: Teneur en protéines de la pomme fraîche et séchée.

Protéines (% MS)	
Pomme fraîche	1,78 ± 0,01 ^a
Séchage par micro-onde	
Puissance (W)	
100	0,99 ± 0,015 ^c
180	1,02 ± 0,001 ^c
300	1,11 ± 0,015 ^{bc}
450	1,41 ± 0,015 ^b
600	0,98 ± 0,030 ^c
900	1,03 ± 0,015 ^c
Séchage à l'étuve sous vide à 200 mbar	
Température (°C)	
45	0,50 ± 0,030 ^e
55	0,73 ± 0,015 ^d
65	0,79 ± 0,015 ^d

Les moyennes suivies d'une lettre différente sont significativement différentes au seuil de $p < 0,05$ d'après le test de Newman et Keuls.

D'après les résultats présentés dans le tableau 25, on remarque que la pomme fraîche renferme une teneur en protéines qui est de 1,78% MS, correspondant à un taux de 0,27 % MF. Cette teneur est conforme à celle signalés par CIQUAL (2017) qui est de 0,26 à 0,30 % MF pour la pomme fraîche. De plus Bretadeau et Fauré (1992) et Shyam et Shafuir (2007) montrent que la teneur en protéines présente dans la pomme est de 0,30 % MF et 0,28 % MF respectivement.

Globalement, une diminution de la teneur en protéines de la pomme est observée pour les deux techniques de séchage appliquées, mais cette diminution est moins importante pour le séchage par microonde par rapport au séchage à l'étuve sous vide, avec une différence significative. La puissance 450 W permet de mieux conserver les protéines avec une teneur de 1,41 % MS, dont le taux de conservation est de 79,21 %. La pomme séchée à l'étuve sous vide à 45°C fournit la plus faible teneur en protéines (0,50 % MS).

Miranda et al. (2010), signalent que le séchage par convection des grains de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) à différentes températures 40, 50, 60, 70 et 80 °C induit une perte moyenne en protéine totale de l'ordre de 20%. Ces auteurs expliquent ces pertes par la

dénaturation des protéines et la participation des acides aminés avec les sucres à la réaction de Maillard (Production des Mélanoidines).

5.4.4. Teneur en hydrates de carbone

Les résultats de la teneur (en % MS) en sucres totaux sucres réducteurs, fibres et pectine de la pommes fraîche et séchée sont regroupés dans le tableau 27.

Tableau 26 : Teneur moyenne en glucides de la pomme fraîche et séchée (en % MS)

	Sucres totaux	Sucres réducteurs	Fibres	Pectine
Pomme fraîche	90,22 ± 0,815 ^a	45,14 ± 1,11 ^a	14,67 ± 0,09 ^a	8,8 ± 0,09 ^a
Séchage par microonde				
Puissance (W)				
100	70,83 ± 0,47 ^{bc}	33,80 ± 1,01 ^c	12,78 ± 0,08 ^{cd}	6,55 ± 0,08 ^d
180	74,95 ± 0,30 ^b	28,07 ± 0,60 ^{cd}	12,80 ± 0,03 ^c	8,02 ± 0,03 ^b
300	74,46 ± 0,22 ^b	39,94 ± 0,14 ^b	12,82 ± 0,08 ^c	8,21 ± 0,08 ^{ab}
450	85,24 ± 0,37 ^{ab}	38,65 ± 1,19 ^b	12,88 ± 0,05 ^c	8,02 ± 0,05 ^b
600	71,09 ± 0,47 ^{bc}	33,64 ± 0,16 ^c	13,03 ± 0,04 ^b	8,51 ± 0,04 ^{ab}
900	75,24 ± 0,33 ^b	16,78 ± 0,23 ^d	11,63 ± 0,04 ^c	7,86 ± 0,04 ^{bc}
Séchage sous vide à 200 mbar				
Température (°C)				
45	47,58 ± 0,57 ^d	7,64 ± 0,66 ^f	10,28 ± 0,07 ^e	2,20 ± 0,09 ^f
55	54,83 ± 0,44 ^c	10,12 ± 0,17 ^f	11,10 ± 0,03 ^{ef}	2,57 ± 0,07 ^{ef}
65	56,89 ± 0,47 ^c	18,21 ± 1,14 ^c	11,22 ± 0,05 ^f	3,20 ± 0,03 ^c

Dans chaque colonne, les moyenne suivie d'une lettre différentes sont significativement différentes au seuil de $p < 0,05$ d'après le test de Newman et Keuls

5.4.4.1. Teneur en sucres totaux

D'après les résultats observés dans le tableau 26, on observe que la pomme fraîche renferme une teneur en sucres de 90,22 % MS, correspondant à un taux de 13,67 %MF, cette teneur est comparable à celles signalées par Nour et al. (2010) et Cuccurullo et al. (2018) qui donnent des valeurs de 12,4 et 11,52 % MF respectivement pour la même variété étudiée.

Toujours en analysant les résultats présentés dans le tableau 26, on note que les sucres de la pomme séchée par microonde sont plus stables et résistent à l'altération par rapport à celles séchées dans l'étuve sous vide, avec une différence significative. Le taux de sucre le plus important est enregistré par une puissance de 450 W (85,24 % MS) avec une perte de 5,74 %.

D'autre part la teneur la plus faible est liée à la pomme séchée à 45 °C /200 mbar 47,58 % MS, correspondant à une perte de 47,26 %.

5.4.4.2. Teneur en sucres réducteurs

Selon les résultats présentés dans le tableau 26, la teneur de la pomme fraîche en sucres réducteurs est de l'ordre de 45,14 % MS, correspondant à un taux de 6,83 % MF, cette teneur est supérieure à celles trouvés par Kalkisim et *al.* (2015) pour les deux variétés Brid et Mahsusa, cultivés en Turquie, et qui sont de 4,20 et 4,64 % MF respectivement.

Les résultats présentés dans le tableau 26, montre que les pertes en sucres réducteurs de la pomme séchée dans l'étuve sous vide (atteint 83,07 %) sont nettement supérieures à celles de la pomme séchée par microonde (atteint 62,82 %), avec une différence significative. La cause de ces pertes est que les sucres participent dans des réactions (Réaction de Maillard) à cause du long séjour dans l'étuve sous vide. Ceci est confirmé par le test de la couleur où on observe une couleur dense par rapport à la couleur originale de la pomme fraîche et la pomme séchée par microonde.

Dans un travail similaire, Spatariu et *al.* (2006) ont observé une diminution de la teneur en sucres réducteurs de la pomme hollandaise (*Golden delicious*) après séchage à l'étuve à 40°C pendant 8 heures, où la teneur passe de 84,18 % MS pour la pomme fraîche à 49,43 % MS pour la pomme séchée.

5.4.4.3. Teneur en fibre

D'après les résultats du tableau 26, la pomme contient 14,67g/100g MS de fibre, correspondant à 2,22 g/100g MF. Ce résultat concorde avec celui signalé par Colin-Henrion (2009) qui montre que la teneur de la pomme en fibre est de 2 à 2,7 g/100g MF.

On constate une diminution de la teneur en fibres de la pomme après séchage pour les deux techniques appliquées, avec une différence significative. Les pertes sont acceptables et varient de 11,17 % à 29,92 % pour les paramètres de séchage 600 W et 45°C/200 mbar respectivement. Fournier (2007) classe les fibres comme des composés peu sensibles aux traitements thermiques, du fait que ces derniers ont peu d'impact sur les teneurs totales en fibre alimentaires. Ils entraînent par contre de façon très générale une augmentation de la teneur en fibres solubles, liée à la sensibilisation des pectines (constitutives de fibres solubles) c-à-d réorganisation interne entre fibres solubles et insolubles.

Des travaux similaires ont mis en exergue l'effet des techniques de séchage sur les fibres. Cloutour (1995) classe les modes de séchage en fonction de l'intensité de la dégradation, le séchage à 100 °C étant le plus drastique et la lyophilisation est la plus douce

sur les fibres de pomme, où le gonflement diminue de 59 et 76 % après séchage par lyophilisation et séchage à 100 °C, respectivement. Cet auteur constate que l'application d'un séchage, en créant un effondrement de la matrice fibreuse, peut changer le volume poreux et ainsi diminuer les propriétés d'hydratation.

5.4.4.3. Teneur en pectine

D'après les résultats de tableau 26, la teneur en pectine de la pomme fraîche est 8,80 % MS. Ce résultat est proche de celui obtenu par Marcon *et al.* (2005) qui est 7,2 % MS pour les mêmes conditions d'extraction.

Les pectines sont bien conservées pour la pomme séchée par microonde à toutes les puissances testées, cependant la pomme séchée aux puissances 300 et 600 W enregistrent les teneurs les plus élevées qui sont 8,51 et 8,21 % MS respectivement, sans différence significative, avec des pertes de l'ordre de 3,30 et 6,71 % respectivement.

Les résultats indiquent également qu'il existe une différence significative entre les deux techniques de séchage appliquées, et également entre les paramètres de la même technique. Ceci met en relief l'effet de la puissance et de la température sur le rendement de la pectine.

Les pertes de la teneur en pectine de la pomme séchée à l'étuve sous vide sont élevées, la plus importante est liée à la température 45°C avec une teneur en pectine équivalente à 2,20 % MS, correspondant à une perte de l'ordre de 75 %.

Selon Lo *et al.* (2002), la température influe sur le rendement de pectine, à cause de la dépolymérisation intense de la pectine due à la forte activité enzymatique (pectinases). La solubilisation de la pectine avec la chaleur a été largement observée dans les différents tissus végétaux, tels que la carotte, la tomate ou la pomme (Diaz *et al.*, 2009; Massiot *et al.*, 1997; Sila *et al.*, 2005). Wang *et al.* (2014) montrent à travers une étude faite sur les méthodes d'extraction des pectines à partir des macs de pomme et de l'albedo des agrumes, que l'utilisation de microonde limiterait, en comparaison avec des protocoles conventionnels, les phénomènes de dépolymérisation de ces dernières préservant par voie de conséquence leurs propriétés physico-chimiques et fonctionnelles.

5.4.5. Micronutriments

5.4.5.1. Teneur en vitamines

Les résultats de la teneur en vitamines de la pomme fraîche et séchée sont regroupés dans le tableau 27.

Tableau 27 : Teneur en vitamines de la pomme fraîche et séchée.

Vitamines	α -tocophérol mg/ 100g MS	β -carotène en mg/ 100g MS	A. ascorbique mg/100gMS
Pomme fraîche	2,37 \pm 0,1 ^a	0,36 \pm 0,05 ^d	27,75 \pm 0,26 ^d
Séchage par micro-onde			
Puissance (W)			
100	0,10 \pm 0,09 ^e	0,015 \pm 0,02 ^d	0,7 \pm 0,15 ¹
180	0,17 \pm 0,14 ^{cd}	0,013 \pm 0,01 ^d	0,9 \pm 0,10 ^e
300	0,14 \pm 0,13 ^d	0,02 \pm 0,01 ^{cd}	1,8 \pm 0,20 ^e
450	0,22 \pm 0,10 ^{bc}	0,052 \pm 0,01 ^b	2,3 \pm 0,11 ^b
600	0,25 \pm 0,06 ^b	0,02 \pm 0,02 ^{cd}	0,5 \pm 0,2 ^f
900	0,26 \pm 0,01 ^b	0,017 \pm 0,02 ^d	0,2 \pm 0,1 ^g
Séchage sous vide à 200 mbar			
Température (°C)			
45	0,19 \pm 0,1 ^c	0,029 \pm 0,03 ^c	2,05 \pm 0,02 ^{bc}
55	0,24 \pm 0,13 ^b	0,052 \pm 0,01 ^b	1,17 \pm 0,04 ^d
65	0,20 \pm 0,05 ^c	0,028 \pm 0,03 ^c	1,76 \pm 0,02 ^c

Dans chaque colonne, les moyennes suivies d'une lettre différente sont significativement différentes au seuil de $P < 0,05$ selon la méthode de Newman et Keuls.

D'après le tableau 27, la teneur en α -tocophérol de la pomme fraîche est 2,37 mg /100g MS, correspondant à 0,36 mg/100g MF. Cette teneur est similaire à celle signalée par CIQUAL (2017) et qui est 0,37 mg/100g MF de la pomme fraîche, mais elle est inférieure à la valeur rapportée par Nguyen (2015) qui est de 0,6 mg/100g MF.

En comparaison à la pomme fraîche, les résultats trouvés montrent que il y'a une perte de α -tocophérol, pour les deux modes de séchage, avec une différence significative. La teneur la plus élevée de α -tocophérol de la pomme séchée correspond à 600 et 900 W et 55 °C/5 mbar (0,25 ; 0,26 et 0,24 mg/100g respectivement), sans différence significative. Alors que la pomme séchée à 100 W présente la plus faible teneur (0,10 mg/100g) correspond à une perte importante qui atteint 72,22 %.

La teneur en β -carotène de la pomme fraîche est 0,36 mg /100g MS, correspondant à 0,057 mg/100g MF. Cette valeur est supérieure à celle signalée par Aprifel (2018) et USDA (2004) qui sont respectivement 21,4 μ g/100g MF et 0,003 mg/100g MF de la pomme.

La teneur la plus élevée de β -carotène de la pomme séchée est obtenue pour la pomme séchée à 55°C/ 5 mbar et à 450W (0,052 mg/100g). La plus faible teneur est observée pour la pomme séchée à 100, 180 et 900 W (0,015 ; 0,013 et 0,017 mg/100mg respectivement), sans différence significative.

La vitamine C représente dans la pomme fraîche, une teneur de 27,75 mg/100g MS, correspondant à 4,2 mg/100g MF. Cette teneur est proche à celle signalée par Nour et *al.* (2010) qui est de 3,8 mg/100g MF pour la même variété étudiée. Les pertes sont observées pour les deux modes de séchage. Néanmoins, la puissance 450 W correspondant à la teneur la plus élevée (2,3 mg/100g MS) pour la pomme séchée. Ceci est comparable aux résultats trouvés par Lavelli et Corti (2011) qui signale des teneurs de 1,9 et 2 mg/100g MS de la vitamine C dans la pomme séchée sous vide (à 40°C) et séchée à l'air (à 60°C) respectivement.

Par rapport aux deux premières vitamines, la Vitamine C se trouve en abondance dans la pomme fraîche. Mais les pertes sont plus importantes. La vitamine C est une substance à faible stabilité, sensible à la variation de température, à la teneur en eau, à l'oxygène et à la lumière causant une oxydation irréversible (Kogan et Garti, 2006 ; Johnston et Haie, 2005).

Plusieurs recherches ont été effectuées à fin de comparer les différents procédés de séchage concernant le maintien de la vitamine C des produits alimentaires. Les résultats attestent généralement la supériorité de la lyophilisation (Asami et *al.*, 2003). La faible perte en vitamine C des produits lyophilisés est surtout attribuée à la basse température et l'utilisation du vide durant le procédé. Les études entreprises récemment sur les carottes ont prouvés ces faits, montrant que la rétention en vitamine C est plus élevée avec la lyophilisation que la déshydratation à air chaud (Yen et *al.*, 2008). Une recherche a révélé qu'un procédé entrepris à une pression inférieure à 0,1 mbar évite l'oxydation par l'air (Silva, 2005).

Selon Raharitsifa (2008), Barrett et *al.* (1997) ont combiné le séchage à micro-onde et la lyophilisation et en comparant cette combinaison avec la lyophilisation conventionnelle, ils ont conclu que la combinaison des procédés présente une rétention de la vitamine C plus élevés que la lyophilisation seule.

5.4.5.2. Teneur en cendres et en minéraux

Les résultats analytiques du taux des cendres et de la teneur en minéraux de la pomme avant et après séchage sont présents dans le tableau 35.

Le taux de cendres de la pomme fraîche est 4,20 % MS, cette valeur se situe dans l'intervalle donné par Bretaudeau et Fauré (1992) qui est de 1 à 5 % du poids sec de la pomme. Cette valeur est nettement supérieure aux valeurs signalées par Kalkisim et *al.* (2015) qui donne un intervalle de 0,60 à 1,53 % du poids sec pour seize variétés de pomme cultivées en Turquie. L'analyse des cendres révèle la richesse de la pomme fraîche en éléments minéraux.

Le tableau 28 montre que les teneurs en Potassium, sodium, calcium et phosphore de la

pomme fraîche sont 773,23 ; 13,22 ; 46,60 et 66,30 mg/100g MS respectivement. La teneur en potassium est comparable à celle obtenue par Manzoor et al. (2012) qui est de 790,1 mg/100g MS pour la même variété étudiée. Le résultat trouvé pour le sodium est proche à celui cité par Boudabous et al. (2013) qui donnent une valeur de 18,46 mg/100g MS pour la variété tunisienne douce de Djerba. La teneur en calcium se trouve dans l'intervalle indiquée par Kalkisim et al. (2015), qui est comprise entre 13,50 à 70 mg/100g MS pour le calcium. La teneur en phosphore est proche à celle signalée par Ferritti et al. (2014) qui est 80 mg/100g MS de la pomme.

Les résultats obtenus montrent que l'effet de la technique de séchage de la pomme par microonde engendre des pertes importantes par rapport à celle séchée à l'étuve sous vide, avec une différence significative. D'autre part, la rétention de minéraux n'apparaît pas en cohérence avec la puissance, ni au barème température/pression.

La pomme séchée par microonde présente des pertes de l'ordre de 58,82 ; 48,51 ; 30,25 et 49,02 % pour P, Ca, Na et K respectivement. La pomme séchée à l'étuve sous vide enregistre des pertes de l'ordre de 61,10 ; 52,01 ; 43,72 et 55,09 % pour P, Ca, Na et K respectivement

Miranda et al. (2010), rapportent une diminution de la teneur en minéraux (P, K, Na, Ca) pour les grains de Quinoa (*Kenopodium quinoa* Wild) séchés dans un séchoir par convection, avec des pertes qui varient de 10 à 58 %. Ils justifient cette diminution par l'interaction de saponines avec les minéraux avant le séchage ou par la diffusion de ces micronutriments dans le milieu intercellulaire.

Tableau 28 : Taux des cendres et des minéraux de la pomme fraîche et séchée (en % MS)

	Teneur en cendres	Taux de potassium (K) (mg/100g)	Taux de sodium (Na) (mg/100g)	Taux de calcium (Ca) (mg/100g)	Taux de phosphore (P) (mg/100g)
Pomme fraîche	4,29 ± 0,06 ^d	773,23 ± 0,01 ^a	13,22 ± 0,05 ^d	48,60 ± 0,005 ^a	66,30 ± 0,01 ^d
Séchage par micro-onde					
Puissance (W)					
100	2,85 ± 0,01 ^c	373,21 ± 0,03 ^{ad}	3,61 ± 0,005 ^d	22,52 ± 0,05 ^c	38,40 ± 0,01 ^d
180	2,88 ± 0,03 ^c	396,54 ± 0,01 ^c	3,77 ± 0,005 ^d	22,5 ± 0,02 ^c	38,66 ± 0,01 ^d
300	2,88 ± 0,04 ^c	379,70 ± 0,01 ^c	3,46 ± 0,005 ^d	22,61 ± 0,005 ^c	39,22 ± 0,01 ^c
450	2,90 ± 0,05 ^c	385,83 ± 0,01 ^d	4,05 ± 0,005 ^c	22,60 ± 0,01 ^c	39,36 ± 0,005 ^c
600	2,85 ± 0,04 ^c	368,96 ± 0,05 ^f	3,66 ± 0,01 ^d	22,64 ± 0,01 ^c	39,79 ± 0,005 ^c
900	2,99 ± 0,41 ^c	398,24 ± 0,32 ^e	4,06 ± 0,01 ^c	22,7 ± 0,01 ^c	39,92 ± 0,01 ^c
Séchage sous vide à 200 mbar					
Température (°C)					
45	3,86 ± 0,04 ^b	425,22 ± 0,01 ^b	5,45 ± 0,01 ^{bc}	24,21 ± 0,02 ^b	40,46 ± 0,005 ^b
55	3,89 ± 0,04 ^b	426,35 ± 0,32 ^b	5,78 ± 0,02 ^b	24,24 ± 0,005 ^b	40,51 ± 0,01 ^b
65	3,69 ± 0,01 ^b	428,54 ± 0,32 ^b	5,97 ± 0,02 ^b	24,23 ± 0,01 ^b	40,63 ± 0,01 ^b

Avec chaque colonne, les moyennes suivies d'une lettre appartiennent significativement différentes et sont de P < 0,05, selon la méthode de Newman et Tukey

5.4.6. Mesures de la couleur

Les paramètres de la couleur prise comme standard sont ceux de la pomme fraîche, où : L_0^* 74,81 ; a_0^* 4,46 ; b_0^* 42,65 ; C_0^* 42,9 et h_0° 84,13,

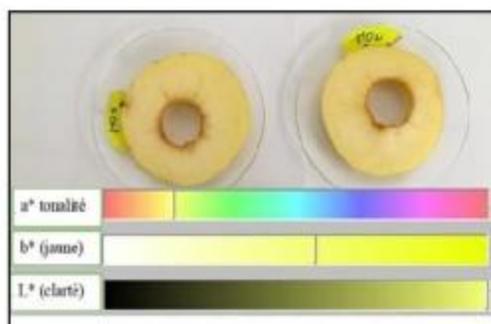
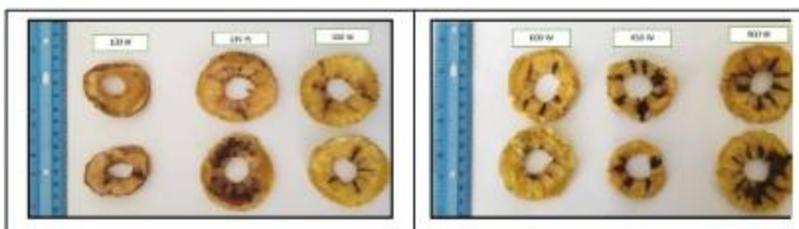


Figure 14 : Paramètre L^* , a^* et b^* et la pomme fraîche.

La figure 14, exprime la couleur solide pour la pomme fraîche, l'espace $L^* a^* b^*$; la valeur L^* mesure la clarté (noir à blanc), la valeur a^* mesure la tonalité chromatique (correspond à la composante colorée de l'échantillon plus précisément) et la valeur b^* mesure la couleur jaune.

Pour les deux techniques de séchage, la différence de la couleur totale des pommes par rapport à un standard est illustrée par dans les figures 15 et 16 respectivement.



Figures 15 : Rondelles de pomme séchée par microonde à différentes puissances (100, 180, 300, 450, 600 et 900 W).

On observe visuellement que la puissance 100W a un effet important sur la couleur jaune qui dévie vers le rouge, à cause de la durée de séchage qui est longue (environ de 132 min) et ceci par rapport aux autres puissances. Cependant à cause de l'hétérogénéité de séchage par microonde on observe des parties très denses.

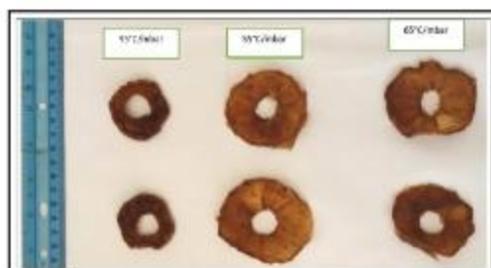


Figure 16 : Rondelles de pommes séchées à l'étuve sous vide (200 mbar) à trois températures (45, 55 et 65°C).

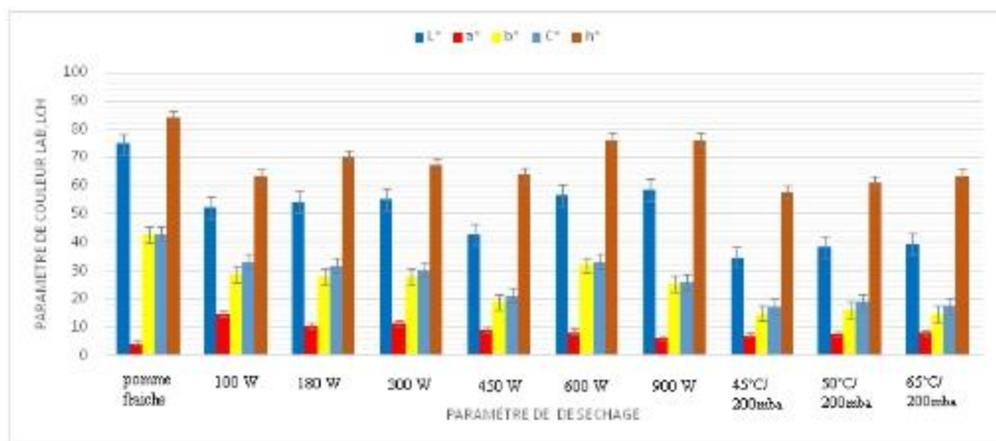
Les observations visuelles de la couleur des rondelles de la pomme séchée par microonde et à l'étuve sous vide, montrent une dégradation progressive de la couleur jaune typique de la pomme fraîche, en passant par la couleur dorée et la couleur brun.

Les résultats des valeurs L^* , a^* , b^* , C^* et h° de la pomme fraîche et séchée sont représentés dans le tableau 29 et la figure 17.

Tableau 29 : Les résultats des valeurs L^* , a^* , b^* , C^* et h° de la pomme fraîche et séchées

	Paramètres de la couleur				
	L^*	a^*	b^*	C^*	h°
Pomme fraîche	$74,90 \pm 1,02^a$	$4,46 \pm 1,21^b$	$42,65 \pm 7,42^c$	$42,9 \pm 7,48^d$	$84,13 \pm 1,01^e$
Séchage par microonde					
Puissance (W)	L^*	a^*	b^*	C^*	h°
100	$52,38 \pm 7,30^{bc}$	$14,83 \pm 1,22^d$	$28,95 \pm 3,17^{bc}$	$33,4 \pm 2,92^{ab}$	$63,35 \pm 3,32^{ab}$
180	$54,25 \pm 15,46^{bc}$	$10,35 \pm 3,35^{ab}$	$27,81 \pm 0,01^{bc}$	$31,75 \pm 8,94^{ab}$	$70,18 \pm 6,67^{ab}$
300	$55,11 \pm 13,79^{bc}$	$11,35 \pm 3,02^{ab}$	$27,9 \pm 5,55^{bc}$	$30,33 \pm 5,01^{abc}$	$67,21 \pm 8,19^{ab}$
450	$42,88 \pm 8,01^{bcd}$	$9,06 \pm 2,05^{ab}$	$19,03 \pm 4,09^{cd}$	$21,23 \pm 3,70^{cd}$	$63,75 \pm 7,78^{ab}$
600	$56,71 \pm 9,34^{bc}$	$8,4 \pm 5,33^{ab}$	$31,98 \pm 3,53^d$	$33,38 \pm 4,35^{ab}$	$76,16 \pm 8,29^{ab}$
900	$58,81 \pm 7,88^b$	$6,06 \pm 1,59^b$	$25,31 \pm 6,77^{bcd}$	$25,91 \pm 7,08^{bcd}$	$76,1 \pm 2,93^{ab}$
Séchage à l'étuve sous vide					
Temperature (°C)	L^*	a^*	b^*	C^*	h°
45°C	$34,85 \pm 8,75^d$	$7,4 \pm 3,68^d$	$15,13 \pm 3,08^d$	$17,26 \pm 3,01^d$	$57,73 \pm 17,18^b$
55°C	$38,43 \pm 10,18^{cd}$	$7,78 \pm 5,19^b$	$16,21 \pm 9,08^{cd}$	$19 \pm 8,56^d$	$61,11 \pm 18,71^{ab}$
65°C	$39,35 \pm 5,01^{cd}$	$8,25 \pm 5,53^{ab}$	$14,95 \pm 6,46^d$	$17,65 \pm 7,25^d$	$63,36 \pm 17,33^{ab}$

Dans chaque colonne, les moyennes suivies d'une lettre différente sont significativement différentes au seuil de $P < 0,05$, selon la méthode de Newman et Keuls



Figures 17: Paramètres de la couleur (L^* , a^* , b^* , C^* et h°) pour la pomme fraîche et séchée.

D'après le tableau 40 et la figure 17, il existe des différences significatives entre la couleur de la pomme fraîche et celle de la pomme séchée pour les deux techniques de séchage et ceci pour tout les paramètres de la couleur L^* , a^* , b^* , C^* et h° .

En général, le microonde conserve mieux la couleur jaune typique de la pomme fraîche, selon les analyses statistiques ($p < 0,05$), la pomme séchée à 600 W est la plus proche à la couleur jaune et la plus claire ($L^* 56,71$). D'autre part, la pomme séchée à l'étuve sous vide fournit les meilleurs paramètres de la couleur pour une température de 55°C.

D'après le tableau 40 et la figure 17, On conclue que les techniques des séchages appliqués et leurs paramètres influent sur les paramètres de la couleur.

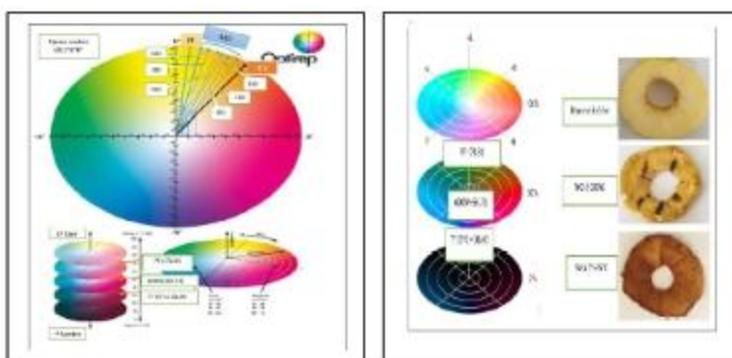


Figure 18: Espace de couleur (paramètres L^* , a^* et b^*) pour la pomme fraîche et séchée.

Selon la figure 18, la pomme séchée à l'étuve sous vide est la plus éloignée à la pomme fraîche (standard), parce qu'elle est moins jaune.

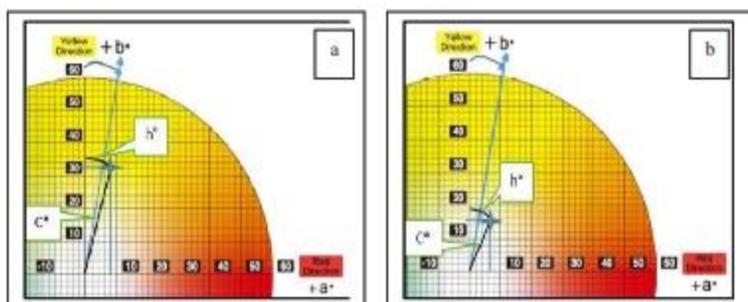


Figure 19 : Paramètres L^* , C^* , h° pour la pomme séchée à 600W (a) et à T 55°C/200mbar (b).

La figure 19, qui exprime la saturation de la couleur (C^*), montre que la valeur C^* enregistrée pour la pomme séchée à 600 W, exprime mieux la saturation de la couleur jaune typique de la pomme fraîche qui sont 33,38 et 42,9 respectivement, ce qui exprime une couleur vive. Alors que la saturation de la couleur jaune de la pomme séchée à 55°C /200 mbar présente une valeur de C^* moins importante qui est 19, ce qui exprime une couleur terne.

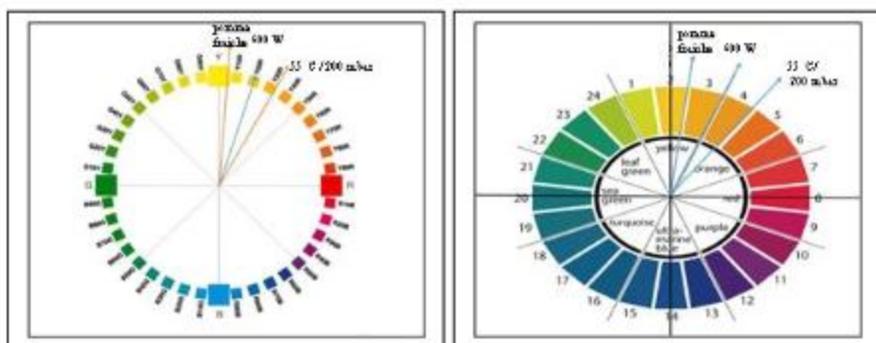


Figure 20 : Angle de couleur h° de la pomme séchée à 600W (a) et à 55°C/200mbar (b).

D'après la figure 20, qui exprime l'angle de la couleur h° , comparant à la pomme fraîche qui a h° Y10R, on remarque que l'angle de couleur h° pour la pomme séchée à 600W est Y20R. Ceci signifie que la pomme renferme 10 % de la couleur rouge et 90 % Couleur jaune.

Pour le séchage à l'étuve sous vide. L'angle de la couleur h° est de Y30R. Cette valeur indique que la pomme renferme 20 % de la couleur rouge, et 80 % de la couleur jaune,

Come le montre la figure 20, la couleur de la pomme séchée à 600 W est située dans la zone jaune, par contre la couleur de la pomme séchée à l'étuve sous vide est située dans la zone orange.

Par conséquent, la conservation de la couleur jaune par la pomme séchée à 55°C / 200 mbar est moins importante par rapport à la pomme séchée à 600W.

Tableau 30: Changement de la couleur (ΔE) de la pomme séchée à 600W et à 55°C/200 mbar.

	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE
Pomme séchée à 600 W	-18,1 ^a	3,94 ^a	-10,62 ^a	21,35 ^a
Pomme séchée à 55°C/200 mbar	-36,38 ^b	3,32 ^b	-26,44 ^b	45,33 ^b

Dans chaque colonne, les moyennes suivies d'une lettre différente sont significativement différentes au seuil de $P < 0,05$ selon la méthode de Newman et Keuls

Le changement de la couleur globale est alors exprimé par la quantité ΔE , distance de couleur, qui tient compte des différences de L^* , a^* et b^* entre un échantillon et un autre échantillon de référence (Standard). La différence de couleur totale (ΔE) pour chaque paramètre (L^* , a^* et b^*) est exprimée comme suit : ΔL^* , Δa^* et Δb^*

D'après le Tableau 41, et en se basant sur les données de Maskan (2000) ; Djendobi, (2012) et Alam *et al.* (2013), on déduit que la pomme séchée à 55°C / 200 mbar est plus dense (ΔL^* -36,38) et plus rouge (Δa^* 3,32) et plus bleue (Δb^* -26,44) que la pomme séchée à 600 W (ΔL^* -18,1 ; Δa^* 3,94 et Δb^* -26,44)

D'après le calcul de la différence de la couleur totale (ΔE), on remarque que les résultats de ΔE sont 21,35 et 45,33 pour la pomme séchée à 600 W et 55 °C /200mbar respectivement, avec une différence significative. La densité de la pomme séchée à 55°C/200mbar provient de l'installation des réactions enzymatique et non enzymatique

On conclue que, le séchage par microonde a moins d'effet sur la couleur de la pomme par rapport au séchage à l'étuve sous vide, suite au long séjour de la pomme dans l'étuve sous vide (360 à 720 min). Chong *et al.* (2014) montrent que la déshydratation thermique des fruits provoque l'installation des réactions enzymatiques (PPO) et non enzymatique (réaction de Maillard), oxydation de l'acide ascorbique et la dégradation des pigments. Par ailleurs, la pomme est riche en sucre réducteurs (6,83 % MF) ceci conduit à l'installation de la réaction de Maillard lorsque les conditions sont favorisantes.

Maskan (2001) a observé le même résultat (augmentation en ΔE en fonction du temps) pour le séchage des kiwis par microonde. Il a également noté l'augmentation de la valeur des

paramètres L^* et a^* et il a montré qu'il y a une corrélation positive entre ce paramètre et la production de pigments bruns.

Les valeurs des paramètres de la couleur (L^* , a^* , b^* et ΔE) trouvés dans cette étude, sont très proches et similaires à celles trouvées par Chong et al. (2013) lorsqu'ils ont séchés la pomme (*Golden delicious*) jaune par des techniques de séchage combinés par microonde (53,58 ; 8,70 ; 23,08 et 21,35 respectivement).

- **Conversion du système Lab. Au système XYZ et détermination de la longueur d'onde dominante**

Afin de mieux estimer l'effet du séchage sur la couleur de la pomme étudiée, une conversion des données du système Lab est faite pour déterminer les paramètres du système XYZ de CIE (tableau 31). En déterminant les coordonnées XYZ de ce système, on peut positionner les pommes étudiés sur le diagramme de chromacité, ce qui nous permet de déterminer la longueur dominante du pigment dominant..

Tableau 31: Conversion du système Lab. Au système XYZ et longueur d'onde du pigment dominant

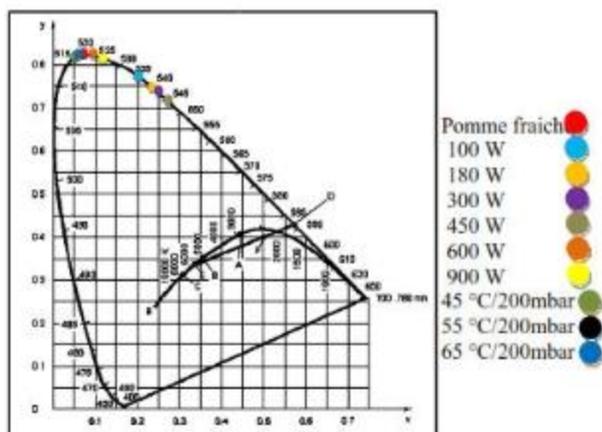
	X	Y	Z	Longueur d'onde (nm)
pomme fraîche	0,4720 ^a	0,4812 ^a	0,1991 ^a	520 ^g
Pomme séchée par microonde				
Puissance (W)				
100	0,2250 ^f	0,2048 ^f	0,0944 ^f	535 ^d
180	0,2329 ^e	0,2221 ^e	0,1090 ^e	540 ^e
300	0,2436 ^d	0,2304 ^d	0,1139 ^d	542 ^h
450	0,1377 ^g	0,1308 ^g	0,0753 ^g	545 ^a
600	0,2528 ^c	0,2463 ^c	0,1092 ^c	521 ^f
900	0,2689 ^b	0,2682 ^b	0,1495 ^b	525 ^e
Pomme séchée à l'étuve sous vide à 200 mbar				
Température (°C)				
45	0,0882 ^j	0,0842 ^j	0,0512 ⁱ	518 ⁱ
55	0,1080 ^j	0,1033 ⁱ	0,0628 ⁱ	518 ⁱ
65	0,1141 ^h	0,1086 ^h	0,0699 ^h	519 ^h

Dans chaque colonne, les moyennes suivies d'une lettre différente sont significativement différentes au seuil de $P < 0,05$ selon la méthode de Newman et Keuls

Le tableau 32 confirme les résultats précédents où la formule($x + y + z - 1$) est vérifiée pour tous les paramètres de séchage.

Tableau 32 : Détermination de x, y et z.

	Pomme fraîche	Pomme séchée par microonde						Séchage à l'étuve sous vide 200mbar		
		100 W	180 W	300 W	450 W	600 W	900 W	45 °C	55°C	65°C
x	0,412	0,429	0,413	0,414	0,401	0,416	0,392	0,394	0,394	0,390
y	0,418	0,424	0,394	0,392	0,380	0,405	0,391	0,377	0,377	0,397
z	0,173	0,180	0,193	0,194	0,219	0,180	0,218	0,229	0,144	0,239
Somme	1,003	1,033	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,915	1,026

**Figure 21**: Distribution des pommes fraîches et séchées sur le diagramme de chromacité.

Les résultats montrent que les pigments dominants des pommes présentent une longueur d'onde de 520 nm à l'état frais (figure 21). Le séchage provoque des modifications la couleur naturelle des produits analysés:

1. Le séchage par microonde donne des pigments présentent des longueurs d'onde supérieures à celle de la pomme fraîche qui varient entre 522 nm et 545 nm. Le séchage à la puissance 600 W semble moins sévère où les longueurs d'onde des produits est 521 nm est plus proches à celles obtenues à l'état frais (520 nm), avec une différence significative.
2. Alors que le séchage sous vide provoque une diminution de la valeur de la longueur d'onde dominante qui varie de 518 nm à 519 nm, avec une différence significative.

Ces résultats sont confirmés par les données théoriques illustrées sur la figure suivante donnée par MacDougall, (2002), où les pigments jaunes présentent des longueurs d'onde de 480 nm à 580 nm.

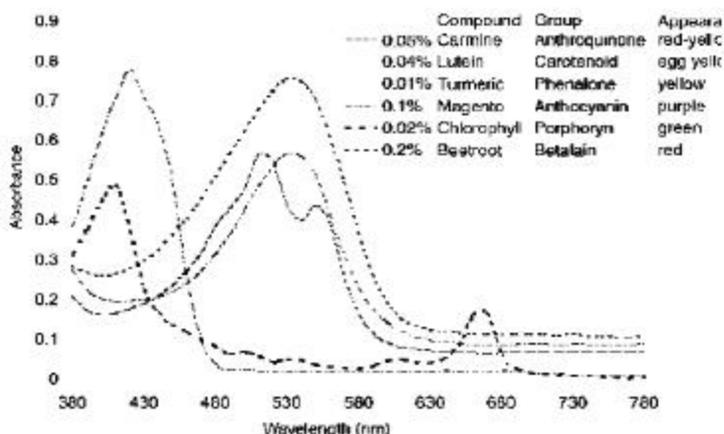


Figure 22: Spectre de principaux pigments naturels des aliments (MacDougall, 2002)

• Degré de détérioration des produits au cours de séchage

Le tableau 33 illustre les valeurs des indices de l'activité enzymatiques étudiés (BI, WI et YI) pour la pomme fraîche et séchée.

Les résultats obtenus montrent une dégradation de la couleur exprimée par la diminution des composants de la couleur (L^* , a^* , b^* , C^* et h°) d'une part et d'autre part par l'augmentation des indices de l'activité enzymatique (BI et WI) et la diminution de l'indice YI par rapport à l'état frais, avec une différence significative. La dégradation est plus importante pour le séchage sous vide.

Ces indices ont fait l'objet de plusieurs études, Das *et al.* (2004) cités par Pathare *et al.* (2013) ont trouvé que l'indice de jaunisse du riz étuvé a augmenté avec une augmentation de l'intensité du rayonnement infrarouge ou une augmentation de la chaleur. D'autre part, Kotwaliwale *et al.* (2007) cités par Pathare *et al.* (2013) ont trouvé que l'indice de blanchiment de champignons a diminué tandis que l'indice de jaunisse a augmenté pendant le processus de séchage.

Tableau 33: Indices de dégradation de la couleur (BI, WI et YI) des pommes fraîches et séchées

	BI	WI	YI
Pomme fraîche	85,47 ± 4,08 ^d	44,22 ± 5,71 ⁱ	81,30 ± 1,30 ^a
Pomme séchée par microonde			
Puissance (W)			
100	98,83 ± 4,53 ^a	58,08 ± 4,09 ^c	79,29 ± 2,41 ^d
180	95,85 ± 3,41 ^b	55,46 ± 2,11 ^e	79,68 ± 2,16 ^c
300	84,92 ± 4,92 ^c	55,61 ± 7,73 ^f	73,31 ± 3,29 ^e
450	72,40 ± 2,83 ^e	61,29 ± 5,89 ^d	63,05 ± 1,84 ^b
600	90,50 ± 0,81 ^c	55,45 ± 4,44 ^b	81,17 ± 4,49 ^b
900	69,99 ± 2,50 ^b	48,84 ± 9,96 ⁱ	64,85 ± 2,13 ^f
Pomme séchée à l'étuve sous vide 200mbar			
Température (°C)			
45	80,92 ± 8,90 ^f	67,87 ± 7,41 ^a	70,238 ± 1,32 ^f
55	64,03 ± 2,72 ⁱ	65,40 ± 6,56 ^b	56,138 ± 1,98 ^f
65	60,31 ± 2,58 ^j	63,72 ± 2,53 ^c	52,135 ± 1,81 ^f

Dans chaque colonne, les moyennes suivies d'une lettre différentes sont significativement différentes au seuil de $p < 0,05$ d'après le test Newman et Keuls

5.4.7. Caractéristiques phytochimiques

Les caractéristiques phytochimiques de la pomme fraîche et séchée sont illustrées dans le tableau 34.

Tableau 34 : Caractéristiques phytochimiques de la pomme fraîche et séchée

	Polyphénols totaux (mg EAG/100g MS)	Flavonoïdes (mgEQ/100mg MS)	Activité antiradicalaire (%)
Pomme fraîche	370,12 ± 0,89 ^a	235,49 ± 0,89 ^a	90,81 ± 1,67 ^a
Séchage par microonde			
Puissance (W)			
100	131,02 ± 2,7 ^c	71,05 ± 1,4 ^c	70,32 ± 1,81 ^f
180	168,31 ± 0,71 ^c	73,46 ± 1,24 ^c	83,71 ± 1,12 ^b
300	160,32 ± 1,10 ^{cd}	101,37 ± 2,08 ^d	76,02 ± 1,43 ^c
450	211,79 ± 1,04 ^b	124,24 ± 0,15 ^c	80,04 ± 2,30 ^b
600	209,27 ± 2,78 ^b	134,81 ± 0,56 ^b	82,52 ± 2,31 ^b
900	157,27 ± 0,56 ^d	116,64 ± 0,34 ^{cd}	81,62 ± 0,27 ^b
Séchage à l'étuve sous vide			
Température (°C)			
45	44,02 ± 3,07 ^e	35,46 ± 0,33 ^e	84,57 ± 0,85 ^b
55	76,44 ± 1,45 ^{de}	34,76 ± 0,77 ^e	68,93 ± 1,80 ^d
65	84,26 ± 1,23 ^f	54,69 ± 0,09 ^f	82,82 ± 2,69 ^b

Dans chaque colonne, les moyennes suivies d'une lettre différentes sont significativement différentes au seuil de $p < 0,05$ d'après le test Newman et Keuls.

5.4.7.1. Teneur en polyphénols totaux

Les teneurs en composées phénoliques totaux des extraits méthanoliques de la pomme fraîche et séchée sont présentées dans le tableau 34.

D'après les résultats obtenus, la pomme contient 370,12 mg EAG/100g MS de polyphénols totaux, correspondant à 56,00 mg EAG/100g MF. Cette valeur est comparable à celle obtenue par Noui (2016) et Chong et al. (2013), qui signalent des teneurs en polyphénols de 41,03 mg EAG/100g MF et 328,52 mg EAG/100g MS respectivement, pour la même variété étudiée.

L'analyse des résultats révèle des pertes du taux des polyphénols totaux de la pomme séchée, dont les plus importantes sont enregistrées par le séchage à l'étuve sous vide, avec une différence significative. La teneur la plus élevée en polyphénols totaux de la pomme séchée correspond à la puissance 600 et 450W (respectivement 211,79 et 209,27 mg EAG/100g MS, sans différence significative) avec un taux de conservation moyen de 57,22 %.

Les plus faibles teneurs reviennent au séchage à l'étuve sous vide aux différentes températures 45, 55, 65°C (respectivement 44,02 ; 51,44 ; 84,26 mg EAG/100g MS, avec une différence significative) où la perte est entre 77,23 et 88,10 %. On constate qu'un séjour long et un vide insuffisant contribuent à diminuer l'effet protecteur des polyphénols envers l'oxydation des cellules (Lopez, 2012).

Les résultats trouvés pour le séchage par microonde sont comparables et conformes à certains travaux. Chong et al. (2013) montrent dans une étude comparative de séchage de quelques fruits, que le séchage combiné par microonde, conserve mieux la teneur en polyphénols totaux de la pomme *Golden delicious* (avec un taux de 76,24 %). Chong et al. (2014) révèlent une très bonne rétention de polyphénols totaux (500 mg EAG/100g MS) de la pomme de Malaysia (variété *Royal gala*) séchée par un séchage combinée (Microonde-sous vide). Aghilinategh et al. (2015) montrent que la rétention des polyphénols (171,39 ; 238,63 et 331,65 mg EAG/100g MS) est en croissance avec l'augmentation de la puissance (200, 400 et 600 W) respectivement.

De nombreux travaux ont étudié l'impact du séchage sous vide sur les polyphénols avec des résultats contradictoires. Lavelli et Corti. (2011) ont comparé un séchage conventionnel à un séchage sous vide de marcs de pommes industriels (*Red delicious* et *Golden delicious*), ils montrent que le séchage à 60°C semble être meilleur que le séchage sous vide à 40°C pour la rétention de anthocyanes et des flavonones sans qu'il ait une différence pour les flavonoles, les dihydrochalcones et les acides hydroxycinnamique. Contrairement aux observations précédentes, Schulze (2014) montre que le séchage de la pomme sous air a engendré la perte

de 44% des quercétines glycosilés alors que le séchage sous vide a protégé les polyphénols de l'oxygène.

5.4.7.2. Teneur en flavonoïdes

Les teneurs en flavonoïdes extractibles des extraits méthanoliques de la pomme sont représentés dans le tableau 34.

La pomme contient 235,49 mg/ 100g MS de flavonoïdes, correspondant à 35,63 mg EQ/100g MF. Cette valeur est proche à celle signalée par Duchene–Massias (2015) avec une teneur de flavonoïdes de 37 mg EQ/100g MF dans la pomme. Ce résultat est supérieur à celui cité par Boudabous et *al.* (2015) qui donne une valeur de 13,12 et 12,47 mg EQ/100g MF, respectivement pour les deux variétés de pommes *Starcrimson sbiba* et *Anna sbiba*.

Selon Duchene–Massias (2015), dans la pomme, les flavonoïdes représentent la classe majoritaire de polyphénols, ceci est confirme nos résultats où les flavonoïdes représentent 63,62 % de polyphénols totaux.

D'après le tableau 34, on observe une diminution de la teneur en flavonoïdes après le séchage. La teneur la plus élevée en flavonoïdes de la pomme séchée est correspondant à la puissance 600W (134,81 mg/100g MS) avec un taux de conservation de 56,90 %.

Les plus faibles teneurs sont enregistrées pour le séchage à l'étuve sous vide (35,46 ; 34,76 et 34,69 %, sans différence significative) avec une perte moyenne de 85,23 % .Cette perte en flavonoïdes peut être expliquée par la durée longue du traitement thermique (360 min à 616 min).

Casquete et *al.* (2014), montrent que la durée du traitement thermique provoque la perturbation, désorganisation des tissus et surtout la décompartmentation cellulaire conduisant à une importante interaction enzyme-substrat pendant le traitement d'où une augmentation de l'activité enzymatique.

5.4.7. 3. Evaluation de l'activité antioxydant par effet du radical DPPH

L'activité antioxydant de l'extrait de la pomme fraîche et séchée est présentée dans le tableau 34.

Le test de DPPH est l'un des tests les plus utilisés pour déterminer l'activité antiradicalaire des extraits de plantes (Laguerre et *al.*, 2007).

Dans le tableau 34, les résultats de l'activité antioxydante ont révélé que les extraits de la pomme fraîche et séchée possèdent une activité antiradicalaire importante qui varie de 68,93 à 90,81 %. Ces résultats sont conformes à celui cité par Noui (2016) qui rapporte à une valeur de 83,77 % pour la même variété étudiée.

L'activité antioxydante la plus élevée de la pomme séchée est observée pour le séchage

par microonde à 180, 450, 600, 900 W (respectivement 83,71 ; 80,04 et 82.52 %) et à l'étuve sous vide à 45 et 65°C à 200 mbar (respectivement 84.57 et 82.82 %), sans différence significative.

Selon Duchene–Massias (2015) et Noui (2016), la capacité antioxydante est due à la teneur en polyphénols totaux, leur profil et éventuellement aux autres substances antioxydantes comme les caroténoïdes, la vitamine A, C et E.

Dans une étude réalisée sur l'effet de température et la vitesse de séchage sur la qualité des tranches de pomme *Ganny smith*, Vega-Glavez et al. (2012) ont noté une dégradation des polyphénols totaux mais ils n'ont pas enregistré des différences significatives entre l'activité antioxydante de la pomme séchée pour différentes températures 40, 60 et 80°C. Ils ont expliqué ça par le développement de produits issus de la réaction de Maillard, contribuant ainsi à la génération et à l'accumulation des composés antioxydants. De même Lavelli et Corti (2011) n'ont pas signalé une différence significative entre les marcs de pomme séchés sous vide à 40 °C (50 mmol TE /kg MS) et les marcs lyophilisés (56 mmol TE /kg MS).

D'autre part, Chong et al. (2014) montrent que les cubes de pomme séchée par un séchage combiné au microonde ont une activité antioxydante (18,84 $\mu\text{mol Trolox/g}$) nettement supérieure par rapport aux cubes séchés par un séchage combiné au sous vide (8,22 $\mu\text{mol Trolox/g}$).

5.5. Analyse factorielle des correspondances (AFC)

Dans le but d'étudier l'effet de techniques de séchage et de représenter graphiquement les différents paramètres de séchage de pomme suivant ces caractéristiques physicochimiques, nous avons soumis le tableau des fréquences de ces facteurs à une Analyse Factorielle des Correspondances (AFC). Le principe est de calculer, à partir de la matrice des données exprimant les fréquences de différentes modalités des variables étudiées, les valeurs prises sous l'hypothèse où leurs distributions sont indépendantes. L'écart entre la matrice des données et la matrice d'indépendance obtenue, fournit une matrice des écarts (matrice résiduelle) qui exprime le premier facteur de l'analyse (facteur1). En répétant l'algorithme précédent, on peut aussi approcher cette matrice des écarts par une autre matrice proportionnelle dont la différence produit un nouveau résidu d'importance inférieure qui sera exprimé par le deuxième facteur (facteur 2). Une nouvelle matrice proportionnelle contenant autant de facteurs d'importance décroissante qu'il y a de rangs à la matrice. En ne prenant en compte que les premiers facteurs (axes 1 et 2) et en projetant les individus et /ou les modalités des variables étudiées sur les plans déterminés par ces facteurs, on peut conserver

l'information la plus pertinente. Ainsi la projection des individus sur le plan des deux premiers facteurs correspond au déploiement le plus important de nuages.

Ces deux facteurs représentent 89,09 % de la dispersion totale. Le facteur 1 représentant 70,17 % de l'inertie, est défini dans le tableau 35 essentiellement à partir des variables suivantes: Acidité titrable (-1,428), sucre réducteurs (-1,332), pectine (-1,157), protéines (-0,733), couleur b (-0,457), polyphénol totaux (1,428) et flavonoides (1,527). Le facteur 2 représentant 18,32 % de l'inertie totale.

Avec cette AFC globale on remarque la projection des individus de l'échantillon total en fonction des observations suivantes (figure 23) : la pomme séchée à l'étuve sous vide à 45°C (2,095) et à 55°C (1,600) et à 65°C (1,254) sont associés et s'opposent à la pomme fraîche (2,296) par rapport à l'axe 1. Le profil de la pomme séchée à 600 W (-0,953) est le plus proche de celui de la pomme fraîche (-0,903) ; à savoir, les flavonoïdes, les polyphénols, protéines, pectines, sucres et les paramètres de la couleur b* et L* par rapport à l'axe 1.

Ces résultats consolident les précédentes analyses et nous permettent de suggérer une influence probable entre les paramètres de séchage et les caractéristiques physicochimiques. Par contre le séchage par microonde à 600W conserve mieux ces paramètres.

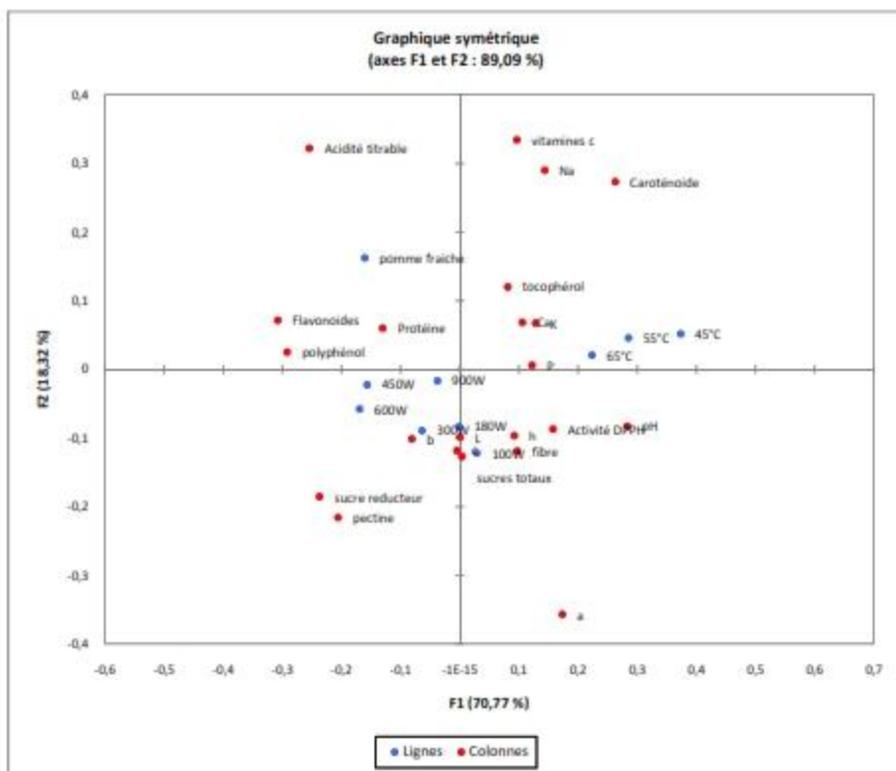


Figure 23 : Projection des paramètres de séchage associés aux paramètres physicochimiques de la pomme sur le plan factoriel 1 et 2.

- Lignes : représentent sur le graphe les paramètres de séchage.
- Colonnes : représentent sur le graphe les paramètres physicochimiques.

Tableau 35: Coordonnées des modalités résultant de l'analyse factorielle des correspondances (AFC).

Modalité	Type	F1	F2
Ligne			
Pomme fraîche		-0,903	1,791
100W		0,161	-1,347
180W		-0,008	-0,921
300W		-0,359	-0,984
450W		-0,880	-0,250
600W		-0,953	-0,637
900W		-0,214	-0,185
45°C/200 mbar		2,095	0,572
55°C/200 mbar		1,600	0,504
65°C/200 mbar		1,254	0,227
Colonne			
pH		1,589	-0,914
Acidité titrable		-1,428	3,554
Protéine		-0,733	0,664
sucres totaux		0,020	-1,400
sucres réducteurs		-1,332	-2,048
pectine		-1,157	-2,381
fibres		0,546	-1,316
α -tocophérol		0,455	1,325
β -Carotène		1,475	3,015
Acide ascorbique		0,540	3,691
Potassium K		0,718	0,743
Sodium Na		0,805	3,202
Calcium Ca		0,592	0,755
Phosphore P		0,685	0,065
Couleur L*		0,001	-1,091
Couleur a*		0,973	-3,942
Couleur b*		-0,457	-1,118
Couleur c*		-0,029	-1,308
Couleur h°		0,516	-1,064
polyphénols		-1,641	0,280
Flavonoïdes		-1,730	0,789
Activité DPPH		0,884	-0,962

5.6. Détermination des propriétés fonctionnelles

5.6.1. Propriétés d'hydratation

5.6.1.1. Capacité d'absorption d'eau et d'huile

Le tableau 36 représente la capacité d'absorption d'eau et d'huile (en %) de la pomme fraîche et séchée.

Tableau 36 : Capacité de la rétention d'eau et d'huile de la pomme fraîche et séchée

Capacité d'Absorption d'eau et d'huile		
	Rétention d'eau (%)	Rétention d'huile (%)
Pomme fraîche	88,67 ± 1,12 ^d	30,12 ± 1,45 ^c
Séchage par microonde		
Puissance (W)		
100	50 ± 2,64 ^c	23,67 ± 1,52 ^d
180	107,33 ± 2,51 ^c	33,33 ± 4,16 ^b
300	167 ± 2,64 ^b	29,33 ± 3,05 ^c
450	222,33 ± 2,51 ^a	35,33 ± 4,05 ^b
600	168 ± 3,00 ^b	36,33 ± 4,16 ^b
900	55,33 ± 3,05 ^c	49,33 ± 4,72 ^a
Séchage à l'étuve sous vide à 200 mbar		
Température (°C)		
45	93,13 ± 1,09 ^{cd}	30,67 ± 1,52 ^c
55	95,47 ± 0,43 ^c	24,41 ± 4,16 ^d
65	97,08 ± 1,17 ^c	34,33 ± 3,05 ^b

Dans chaque colonne, les moyennes suivies d'une lettre différente sont significativement différents au seuil de $p < 0,05$ d'après la méthode de Newman et Keuls.

D'après les résultats mentionnés dans le tableau 36, on remarque une bonne rétention d'eau pour la pomme séchée (varie de 50 à 222,33 %). Une différence significative est observée entre les paramètres de séchage étudiés. L'analyse statistique montre que la pomme séchée par microonde présente une réhydratation importante par rapport à celle séchée à l'étuve sous vide. La puissance 450 w correspond à la meilleure capacité d'absorption d'eau (222,33 %).

Selon le tableau 36, on observe que la pomme séchée présente une faible rétention d'huile qui varie de 24,41 à 49,33 %, avec une différence significative, la puissance 180 W correspond au pourcentage le plus élevé (49,33 %).

La capacité de la rétention d'eau et de l'huile dépend de la structure des macromolécules de nature protéique et polysaccharidique, Les interactions entre l'eau et les constituants s'établissent au niveau des groupements acides et des groupements amines présents dans les polysaccharides ou au niveau des groupements polaires non chargés

susceptibles de former des liaisons hydrogènes avec l'eau. Alors que les groupements apolaires par leur caractère hydrophobe peuvent contribuer à structurer l'eau qui se trouve dans leur environnement. Selon Cloutour (1995), les traitements thermiques tel que le séchage par microonde est susceptible de modifier la teneur en polysaccharides et en protéines et par conséquent sur la capacité d'absorption d'eau et d'huile.

On remarque que la capacité de la rétention d'eau est nettement supérieure à celle de l'huile ceci est expliqué par l'abondance des groupements hydrophiles par rapport aux groupements hydrophobes, dont la pomme est riche en polysaccharides (12,6 à 15,3 % MF) et pauvre en lipide (0,36 % MF) (Kaushal et Sharma, 1995). D'autre part, Colin-Henrion (2008), montre que la capacité de la rétention d'eau est proportionnelle à la teneur en fibres, il ajoute que l'application d'un séchage, en créant un effondrement de la matrice fibreuse, peut changer le volume poreux et ainsi diminuer les propriétés d'hydratation. En comparant les résultats obtenus dans ce travail, on remarque une corrélation positive entre la teneur en fibres et la capacité de la rétention d'eau (0,629) (tableau 43).

La capacité de rétention d'eau joue un rôle majeur dans la qualité de la texture d'aliments. L'imbibition des polysaccharides conduit à une augmentation des propriétés rhéologiques d'épaississement et de viscosité (Kunzek et al., 1999).

Ces résultats sont similaires à ceux trouvés par Cuccurullo et al. (2018) qui montrent que la pomme (*Golden delicious*) séchée par microonde assisté à différentes températures (60, 70 et 80 °C) présente une bonne réhydratation qui est de 86, 89 et 90 % respectivement. Horuz et al. (2017) montrent que la capacité de rétention d'eau est proportionnelle à la puissance et à la température de séchage, ils confirment que la cerise séchée par un séchage combiné par microonde admet une capacité de rétention d'eau plus importante que celle séchée par convection.

5.6.1.2. Solubilité

Les résultats de la solubilité de la pomme fraîche et séchée sont rassemblés dans le tableau 37.

Tableau 37. Solubilité de pomme fraîche et séchée.

Solubilité (%)	
Pomme fraîche	92,2 ± 0,26 ^a
Séchage par microonde	
Puissance (W)	
100	90,90 ± 1,20 ^a
180	91,50 ± 0,61 ^a
300	91,67 ± 0,58 ^a
450	92,03 ± 0,06 ^a
600	92,03 ± 0,19 ^a
900	91,67 ± 1,08 ^a
Séchage à l'étuve sous vide à 200 mbar	
Température (°C)	
45	90,01 ± 0,61 ^a
55	91,50 ± 1,69 ^a
65	91,90 ± 1,01 ^a

Les moyennes suivies d'une lettre différente sont significativement différents au seuil de $p < 0,05$ d'après la méthode de Newman et Keuls.

En analysant les résultats, on note que la solubilité de la pomme fraîche et séchée par microonde et à l'étuve sous vide, est excellente (supérieur à 90 %), sans différence significative.

La solubilité des macromolécules est influencée par plusieurs paramètres (pH, force ionique, séchage, concentration, température, ...). Généralement les composants de la pomme comme la pectine et les sucres sont solubles dans l'eau tandis que les protéines et les lipides sont aisément solubles dans les solutions acides diluées au-dessous de pH 6 (pH au voisinage de 4). Ceci explique l'utilisation de l'acide acétique dans cette technique (une solution acétique à 1% est équivalente à un pH 4).

Linden et Lorient (1994), rapportent que la solubilité a des conséquences majeures sur les autres propriétés fonctionnelles (Emulsification, gélification,.....). D'autre part, selon les résultats obtenus, le séchage appliqué n'a pas un effet négatif ; par contre il conserve cette propriété. De ce fait les autres propriétés seront plus au moins conservées.

5.6.1.3 Viscosité

Les résultats de la viscosité apparente de la pomme fraîche et séchée sont rassemblés dans le tableau 38.

Tableau 38. Viscosité de la pomme fraîche et séchée

Viscosité (Pa.s)				
concentrations (%)	8	12	16	20
Pomme fraîche	5,35±0,4 ^a	12,89±0,11 ^b	15,88±0,36 ^b	27,77±0,03 ^a
Séchage par microonde (W)				
Puissance (W)				
100	1,08±0,07 ^t	2,80 ±0,03 ^q	5,63±0,25 ^o	13,13±0,24 ^l
180	2,63±0,00 ^r	9,59±0,02 ^m	15,98±0,12 ⁿ	24,14±0,25 ^f
300	3,70±0,05 ^q	9,61±0,01 ^m	15,16±0,07 ^h	23,00±0,07 ^e
450	2,80 ±0,23 ^q	8,01±0,02 ⁿ	18,03±0,10 ^r	24,04±0,03 ^e
600	3,68±0,08 ^q	10,25±0,01 ^m	20,75±0,15 ^c	26,44±0,00 ^b
900	1,11±0,13 ^t	2,63±0,09 ^r	5,35±0,05 ^q	12,89±0,05 ^j
Séchage à l'étuve sous vide à 200 mbar				
Température (°C)				
45	0,99±0,02 ^m	1,96±0,00 ^r	2,53±0,12 ^r	5,400±0,14 ^q
55	0,70±0,00 ^u	1,01±0,14 ^u	2,30±0,00 ⁿ	4,73±0,02 ^o
65	0,40±0,02 ^r	1,04±0,00 ^m	2,23±0,02 ⁿ	3,90±0,39 ^m

Les moyennes suivies d'une lettre différente sont significativement différentes au seuil de $p < 0,05$ d'après la méthode de Newman et Keuls.

Le tableau 38, illustre les résultats de la viscosité apparente de la pomme fraîche et de la pomme séchée en fonction de la concentration de la solution en pomme qui varié de 8 à 20 %. On remarque qu'il existe une différence significative entre la viscosité de la pomme séchée et celle de la pomme fraîche. Une diminution de la viscosité de la pomme après séchage est observée. Les plus faibles valeurs de la viscosité sont observées pour la pomme séchée à l'étuve sous vide et pour des différentes concentrations.

D'après le tableau 38, on observe qu'il y a une corrélation positive entre l'augmentation de la viscosité et la concentration en pomme. Ceci est logique, vu que l'augmentation de la concentration en pomme augmente la quantité de la pectine (principale substance responsable de cette propriété). Même observation est signalée par Espinosa-Brisset (2012) celui-ci témoigne que la viscosité de la purée de la pomme augmente de 0,4 à 30 Pa.s avec une augmentation de la Concentration de 10 % à 40 % respectivement.

Des travaux similaires montrent que le traitement thermique influe sur la viscosité des pectines et leur solubilisation. Dans le cas du concentré de tomate, une augmentation de la solubilisation des pectines est liée à la diminution de sa viscosité (Den Ouden et Van Vliet, 1997; Goodman et al., 2002 ; Diaz et al., 2009).

Dans la présente étude, une forte corrélation positive est observée entre la teneur en pectine et la viscosité qui est de 0,778 ; 0,822 ; 0,836 et 0,927 pour des concentrations de 8, 12, 16 et 20% respectivement (tableau 43).

5.6.2. Propriétés de surface

5.6.2.1. Capacité émulsifiante et stabilité d'émulsion

L'ensemble des résultats de la capacité émulsifiante et la stabilité d'émulsion de la pomme fraîche et séchée sont groupés dans le tableau 39.

Tableau 39. Résultats de la capacité émulsifiante et la stabilité des émulsions de la pomme fraîche et séchée

Capacité émulsifiante et stabilité d'émulsion		
	Capacité émulsifiante (%)	Stabilité d'émulsion %
Pomme fraîche	63,68 ± 2,47 ^{ab}	86,45 ± 3,23 ^b
Séchage par microonde		
Puissance (W)		
100	60,00 ± 3,46 ^b	92,33 ± 1,51 ^a
180	64,00 ± 4,58 ^{ab}	92,33 ± 0,57 ^a
300	63,00 ± 2,64 ^{ab}	93,33 ± 0,57 ^a
450	65,67 ± 0,57 ^{ab}	93,67 ± 0,57 ^a
600	69,67 ± 3,51 ^a	81,67 ± 2,88 ^c
900	61,67 ± 3,51 ^b	86,33 ± 3,51 ^b
Séchage à l'étuve sous vide à 200 mbar		
Température (°C)		
45	30,38 ± 0,35 ^d	85,01 ± 0,56 ^b
55	43,15 ± 1,82 ^c	80,54 ± 2,48 ^c
65	45,21 ± 1,57 ^c	81,76 ± 3,51 ^c

Dans chaque colonne, les moyennes suivies d'une lettre différente sont significativement différents au seuil de $p < 0,05$ d'après la méthode de Newman et Keuls.

Le tableau 39 montre la capacité émulsifiante et la stabilité des émulsions de pomme fraîche et séchée. Pour la capacité d'émulsion, une différence significative est observée entre la pomme fraîche et la pomme séchée. La capacité émulsifiante la plus importante correspond à la pomme séchée à 600 W (69,67 %) et la plus faible revient à la pomme séchée à 45 °C/200mbar (30,38 %). Concernant la stabilité, on remarque une bonne stabilité d'émulsion (supérieur à 80 %) pour la pomme séchée par microonde par rapport à celle séchée à l'étuve sous vide.

Le séchage par microonde conserve cette propriété par rapport au séchage à l'étuve sous vide. La puissance et la température ont une influence sur cette propriété.

Les émulsions sont des systèmes hétérogènes dans lesquels deux liquides non miscibles sont dispersés sous forme de gouttelettes. Ces systèmes sont thermodynamiquement instables et nécessitent l'addition d'un stabilisant appelé émulsifiant. Les plus utilisés dans la formulation sont des tensioactifs monomériques, des macromolécules ou des particules solides, soit des polymères synthétiques ou des macromolécules biologiques qui peuvent aussi assumer cette fonction.

Dans des travaux similaires cette stabilité est bien expliquée, Schmidt *et al.* (2015) montrent que le matériel de pomme dispersé dans l'eau constitue un gel et ne peut exclure que la stabilisation à cause du piégeage des gouttes dans le réseau viscoélastique constitué par les particules (fibres et parois végétales). D'autre part, les pectines peuvent jouer un rôle dans l'émulsification comme il a été signalé par Kermani *et al.* (2015) avec des pectines d'épiderme de mangue. De plus Duchene-Massias (2015) dans une étude portée sur la valorisation fonctionnelle de la pomme montre que la stabilité des émulsions provient d'une augmentation de la viscosité de la phase aqueuse et donc un maintien des gouttelettes d'huile par leur immobilisation et piégeage dans un réseau végétal. Figueroa Espinoza *et al.* (2015) précisent que les tanins de la pomme et notamment, les polymères d'épicatéchine ont des propriétés émulsifiantes (propriétés des polyphénols et des hydrocolloïdes).

Il vient que, la richesse de la pomme en polyphénols, pectine et fibre, ainsi que la stabilité de ces constituants pendant le séchage, justifient la stabilité des émulsions. Dont on observe une forte corrélation entre cette propriété et les polyphénols (0,672), pectine (0,873) et fibres (0,721) (tableau 43).

La pomme séchée peut être utilisée comme matériel tensioactif ou matériel fonctionnel (sucrant, épaississant, aromatisant) riche en fibres et en polyphénols, incorporable dans des matrices alimentaires.

5.6.2.2. Capacité moussante

Le pouvoir moussant calculé est nul pour toutes les pommes séchées par microonde et à l'étuve sous vide. Selon Lorient *et al.* (1988) la formation des mousses est basée sur la présence des protéines en quantité et en qualité, de ce fait la teneur de pomme en protéines (0,27 % MF) est insuffisante pour générer une mousse.

5.6.3 Propriétés de structuration

5.6.3.1. Capacité gélifiante

Les résultats de la capacité gélifiante de la pomme fraîche et séchée sont regroupés dans le tableau 40.

Tableau 40. Les résultats de La capacité gélifiante en (%) de la pomme fraîche séchée

Capacité gélifiante (%)						
Concentration (%)	2	4	8	12	16	20
Pomme fraîche	14,34±1,02 ^b	16,09±0,44 ^f	28,55±2,11 ^{ef}	44,16±1,66 ^{de}	76,11±0,09 ^f	100±0,00 ^a
Séchage par microonde						
Puissance (W)						
100	20,00±1,11 ^{gh}	23,63±0,01 ^l	40,00±1,01 ^{lm}	46,36±0,00 ^{ks}	46,54±0,03 ^{ks}	50,00±1,40 ^t
180	16,36±0,12 ^g	55,45±0,51 ^d	43,63±0,00 ^{km}	74,54±0,42 ^c	75,18±0,00 ^e	76,18±0,00 ^f
300	12,72±2,01 ^b	27,27±0,01 ^{ef}	31,81±0,00 ^g	59,09±0,00 ^{cd}	100±0,00 ^a	100±0,00 ^a
450	14,04±0,23 ^b	24,34±0,30 ^f	50,00±1,01 ^d	100±0,00 ^a	100±0,00 ^a	100±0,00 ^a
600	13,63±1,71 ^b	21,18±0,10 ^h	25,45±0,30 ^f	97,27±0,01 ^b	100±0,00 ^a	100±0,00 ^a
900	15,45±1,01 ^d	36,36±0,00 ^e	76,36±0,00 ^e	54,54±0,00 ^d	100±0,00 ^a	100±0,00 ^a
Séchage à l'étuve sous vide à 200 mbar						
Température (°C)						
45°C	4,03±1,90 ^h	5,21±0,33 ^h	5,67±1,15 ^l	13,33±0,34 ^b	18,87±2,09 ^h	24,12±1,30 ^f
55°C	6,05±0,87 ^f	6,05±0,07 ^l	20,07±0,33 ^h	29,31±1,12 ^{ef}	36,06±0,05 ^e	44,23±2,43 ^{de}
65°C	9,00±0,04 ^d	12,14±1,12 ^b	27,32±1,09 ^{ef}	33,12±0,54 ^d	43,06±0,21 ^{de}	56,55±0,36 ^d

Les moyennes suivies d'une lettre différente sont significativement différents au seuil de $p < 0,05$ d'après la méthode de Newman et Keuls.

Le tableau 40 présente la capacité gélifiante de la pomme fraîche et séchée. Cette propriété est étudiée en fonction de la concentration en pomme qui s'étale de 2 à 20 %.

Globalement, on remarque pour tous les paramétrés de séchage une augmentation proportionnelle du pouvoir gélifiant avec l'augmentation de la concentration, ce qui est logique vue que la concentration exprime le pourcentage des agents de gélification (polysaccharides, spécifiquement fibres et pectine).

Selon Marlène et Vierling (2001), un gel est un système colloïde où les macromolécules (protéines et polysaccharides) s'organisent localement en réseaux à structure figée entourée d'eau, plus au moins stable car les interactions macromolécules-eau et eau-macromolécules évoluent vers une organisation plus poussée.

Le pouvoir gélifiant pour la pomme séchée à 300, 450, 600 et 900 W et pour les concentrations 16 et 20 % sont excellentes, il atteint les 100 %, Lorient et al. (1988) dévoilent que la présence des polysaccharides modifie complètement les propriétés

rhéologiques, amenant les modifications désirées dans la texture de l'aliment, ceci est conditionné par la nature des polysaccharides et les conditions de la mise en œuvre (pH, température,).

Selon le tableau de corrélation on observe des corrélations positives entre les fibres, pectine et la capacité gélifiante pour différentes concentrations (tableau 43). Cette corrélation varie de 0,607 à 0,874 pour la pectine et de 0,607 à 0,647 pour les fibres.

De façon générale, les résultats obtenus présentent un intérêt industriel concernant la formation des gels (confiture, flan,...).

L'effet des paramètres de séchage est confirmé par les différences significatives observées dans le tableau 45. Dans une étude similaire réalisé par Saidou (2012) qui a étudié l'influence de la température de séchage (40, 50, 60, 70, 80°C) sur les propriétés fonctionnelles des gomme Hydrocolloïdes des écorces de *Triumfetta corfiola* et *Bidellia* où il montre que le séchage des écorces à des températures inférieures à 60°C n'affecte pas les propriétés de leurs gommages.

5.6.4. Densité

Les résultats de la densité de la pomme fraîche et séchée sont rassemblés dans le tableau suivant.

Tableau 41. Résultats de la densité de pomme fraîche et séchée

Densité	
Pomme fraîche	0,86 ± 0,02 ^a
Séchage par micro-onde	
Puissance (W)	
100	0,57 ± 0,01 ^d
180	0,55 ± 0,01 ^d
300	0,50 ± 0,01 ^{dc}
450	0,47 ± 0,01 ^c
600	0,43 ± 0,01 ^c
900	0,40 ± 0,01 ^c
Séchage Sous vide à 200 mbar	
Température (°C)	
45	0,71 ± 0,01 ^b
55	0,67 ± 0,01 ^{bc}
65	0,63 ± 0,01 ^c

Les moyennes suivies d'une lettre différente sont significativement différents au seuil de $p < 0,05$ d'après la méthode de Newman et Keuls.

D'après le tableau 41, la densité de la pomme fraîche est de 0,76, cette valeur est conforme à celles signalées par chaftel et al. (1979) et Shyam et Shafuir (2007) qui sont de 0,8 et de 0,873 respectivement.

Le tableau 41, fait apparaître une différence significative entre la pomme fraîche et séchée par microonde et à l'étuve sous vide. On note une diminution de la densité de la pomme après séchage, en effet la puissance et la température ont un impact sur cette diminution.

En terme générale, la densité de la pomme séchée par microonde est nettement inférieur par rapport à celle séchée à l'étuve sous vide, avec une différence significative. La densité est inversement proportionnelle à l'augmentation de la puissance et à la température. La plus faible densité (0,47 ; 0,43 et 0,40) est enregistrée avec des puissances 450, 600 900 W respectivement, sans différence significative. Alors que la densité la plus élevée de la pomme séchée (0,71) correspond à 45 °C/200mbar.

Selon Nathakarankule et al. (2010) Cette diminution peut être due au changement de la texture et à la porosité pendant le processus de séchage. Une augmentation de la température et de la puissance provoque une diminution de la densité et une légère augmentation de la porosité. Alors, qu'un séchage rapide provoque une porosité importante et par conséquent une faible densité, l'inverse est vrai pour le séchage lent.

Cette propriété présente un avantage au conditionnement et au stockage

Ces résultats sont similaires à ceux trouvés par Aghilinategh et al. (2015), ces auteurs montrent une corrélation négative entre la densité (qui varie de 0,427 à 0,858) et les paramètres de séchage (Puissance, température et la vitesse de l'air) des rondelles de pomme (variété *Golden delicious* rouge), ils montrent également que la densité de la pomme séchée par un séchage combiné par microonde est inférieure au séchage à l'air chaud.

5.7. Analyse factorielle des correspondances (AFC) :

Ces deux facteurs représentent 68,14 % de la dispersion totale. Le facteur 1 représentant 39,17 % de l'inertie, est défini dans le tableau 42 essentiellement à partir des variables suivantes: densité (2,531), Solubilité (1,644), rétention d'huile (1.200), capacité gélifiante à 4 % (-1,549), capacité gélifiante à 12 % (-0,929), viscosité à 16% (-1,919) et viscosité à 12 % (-1,857). Le facteur 2 représentant 28,26 % de l'inertie totale.

Sur cette AFC globale on remarque la projection des individus de l'échantillon total en fonction des observations suivantes (figure 24) : la pomme séchée à l'étuve sous vide à 45°C (2,936) et à 55°C (1,745) et à 65°C (1,254) sont associés et s'opposent à la pomme fraîche (-0,500) et la pomme séchée au microonde à 180 w (-0,493), 300 (-0,275), 450 (-0,244), 600 (-0,878) et 900 W (-0,675) par rapport à l'axe 1. La pomme séchée à 600 W (-0,953) est fortement liée à la capacité gélifiante à 8 % (-0,868) et 12 % (-0,929). Comme elle est liée à la viscosité à 8 (-1,337), 12 (-1,857), 16 (-1,919), et 20% (-1,481).

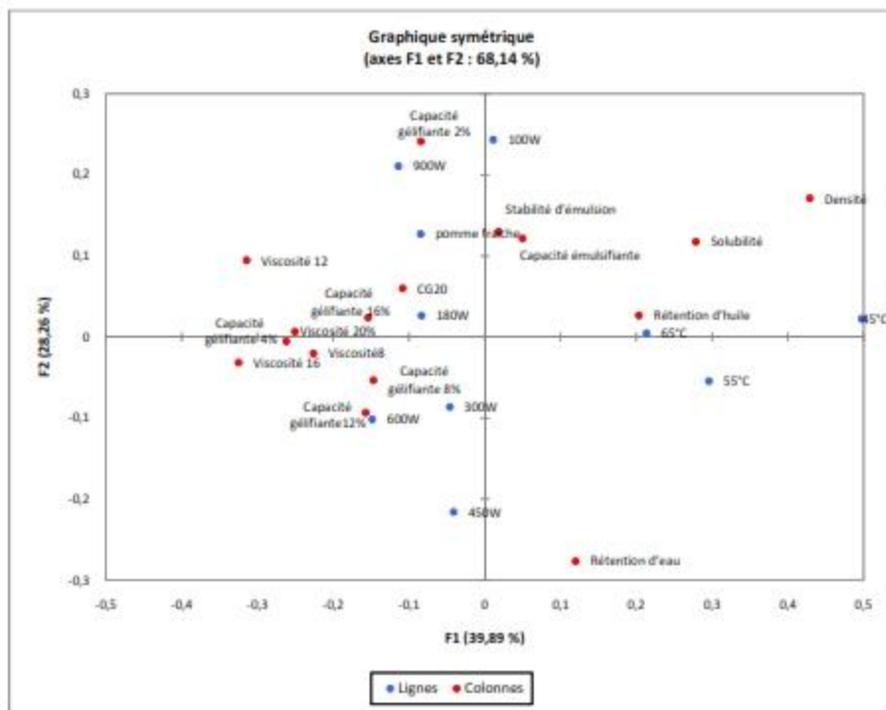


Figure 24 : Projection des paramètres de séchage associés aux paramètres physicochimiques de la pomme sur le plan factoriel 1et 2.

- Lignes : représentent sur le graphe les paramètres de séchage.
- Colonnes : représentent sur le graphe les propriétés fonctionnelles.

Tableau 42: Coordonnées des modalités resultants de l'analyse factorielle des correspondances (AFC).

Modalité	Type	F1	F2
Ligne			
Pomme fraîche		-0,500	0,892
100W		0,064	1,707
180W		-0,493	0,184
300W		-0,275	-0,604
450W		-0,244	-1,514
600W		-0,878	-0,713
900W		-0,675	1,477
45°C/200 mbar		2,936	0,158
55°C/200 mbar		1,745	-0,381
65°C/200 mbar		1,259	0,033
Colonne			
Rétention d'eau		0,706	-1,942
Rétention d'huile		1,200	0,187
Solubilité		1,644	0,826
Capacité émulsifiante		0,294	0,853
Stabilité d'émulsion		0,108	0,910
Capacité gélifiante 2		-0,499	1,693
Capacité gélifiante 4		-1,549	-0,038
Capacité gélifiante 8		-0,868	-0,374
Capacité gélifiante 12		-0,929	-0,654
Capacité gélifiante 16		-0,910	0,169
Capacité gélifiante 20		-0,641	0,421
Densité		2,531	1,200
Viscosité8		-1,337	-0,143
Viscosité 12		-1,857	0,664
Viscosité 16		-1,919	-0,221
Viscosité 20		-1,481	0,047

Tableau 43: Matrice de corrélation (Pearson) entre les paramètres physicochimiques et les propriétés fonctionnelles.

Variables	pH	Acidité titrable	Protéine	Sucres totaux	Sucres réducteur	Pectine	Fibre	α -tocophérol	B-carotène	vitamines C
Rétention d'eau	-0,470	0,010	0,529	0,507	0,610	0,546	0,629	0,021	-0,103	0,142
Rétention d'huile	-0,181	-0,306	0,122	0,081	-0,239	0,210	-0,298	0,126	-0,504	-0,488
Solubilité	-0,738	0,353	0,652	0,749	0,640	0,887	0,720	0,321	-0,087	0,111
Capacité émulsifiante	-0,956	0,356	0,467	0,887	0,792	0,873	0,721	-0,031	-0,311	-0,064
Stabilité d'émulsion	-0,626	0,058	0,147	0,560	0,578	0,575	0,466	-0,490	-0,399	0,075
Capacité gélifiante 2	-0,898	0,280	0,152	0,745	0,677	0,757	0,614	-0,170	-0,455	-0,206
Capacité gélifiante 4	-0,706	-0,023	0,203	0,512	0,316	0,639	0,620	-0,294	-0,618	-0,374
Capacité gélifiante 8	-0,603	-0,029	0,209	0,540	0,177	0,607	0,607	-0,012	-0,424	-0,400
Capacité gélifiante 12	-0,735	0,016	0,439	0,649	0,611	0,731	0,699	0,017	-0,363	-0,198
Capacité gélifiante 16	-0,824	0,235	0,647	0,780	0,647	0,858	0,647	0,220	-0,286	-0,087
Capacité gélifiante 20	-0,837	0,408	0,765	0,853	0,698	0,874	0,641	0,304	-0,178	0,058
Densité	0,443	0,562	0,116	-0,150	-0,058	-0,370	0,121	0,353	0,752	0,749
Viscosité 8	-0,652	0,749	0,787	0,760	0,832	0,778	0,899	0,441	0,219	0,542
Viscosité 12	-0,716	0,639	0,752	0,771	0,834	0,821	0,883	0,310	0,060	0,424
Viscosité 16	-0,754	0,390	0,661	0,744	0,803	0,836	0,787	0,190	-0,118	0,195
Viscosité 20	-0,857	0,544	0,694	0,854	0,866	0,927	0,892	0,219	-0,107	0,252

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification: alpha=0,05 (selon Pearson).

Tableau 43: Matrice de corrélation (Pearson) entre les paramètres physicochimique et les propriétés fonctionnelles (suite).

Variables	Na	K	Ca	P	L ^a	a ^b	b ^c	C ^d	h ^e	polyphénols	Flavonoïdes	Activité DPPH
Rétention d'eau	-0,243	-0,194	-0,145	-0,117	0,082	0,105	0,128	0,050	0,113	0,387	0,335	0,385
Rétention d'huile	-0,410	-0,389	-0,403	-0,368	0,001	-0,287	-0,186	-0,239	0,213	-0,091	0,010	0,273
Solubilité	-0,037	0,069	0,125	0,165	0,499	-0,133	0,313	0,302	0,533	0,679	0,661	0,300
Capacité émulsifiante	-0,090	0,049	0,100	0,122	0,698	0,287	0,669	0,655	0,386	0,672	0,574	0,055
Stabilité d'émulsion	-0,286	-0,162	-0,134	-0,136	0,218	0,570	0,234	0,200	-0,042	0,238	0,142	-0,096
Capacité gélifiante 2	-0,150	-0,019	0,035	0,050	0,650	0,443	0,643	0,669	0,492	0,525	0,451	-0,030
Capacité gélifiante 4	-0,359	-0,240	-0,234	-0,219	0,410	0,276	0,336	0,333	0,552	0,245	0,139	0,129
Capacité gélifiante 8	-0,316	-0,229	-0,229	-0,190	0,329	0,062	0,145	0,101	0,335	0,210	0,217	-0,045
Capacité gélifiante 12	-0,353	-0,270	-0,215	-0,180	0,302	0,174	0,320	0,261	0,361	0,475	0,403	0,095
Capacité gélifiante 16	-0,170	-0,058	-0,010	0,037	0,585	-0,058	0,498	0,395	0,625	0,612	0,618	0,208
Capacité gélifiante 20	0,026	0,144	0,182	0,223	0,705	-0,148	0,615	0,547	0,745	0,740	0,709	0,366
Densité	0,834	0,784	0,754	0,720	0,069	-0,354	0,139	0,183	0,015	0,169	0,150	0,252
Viscosité8	0,449	0,551	0,605	0,629	0,762	-0,213	0,815	0,715	0,720	0,888	0,853	0,489
Viscosité 12	0,306	0,419	0,472	0,494	0,722	-0,110	0,780	0,700	0,684	0,845	0,775	0,490
Viscosité 16	0,019	0,124	0,185	0,215	0,553	0,020	0,619	0,532	0,556	0,719	0,653	0,350
Viscosité 20	0,129	0,260	0,321	0,348	0,725	0,012	0,769	0,676	0,676	0,831	0,757	0,393

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha=0,05$ (selon Pearson)

Conclusion

Conclusion

La plupart des fruits que nous consommons perdent progressivement leurs valeurs nutritives dès qu'ils sont cueillis et pendant qu'ils sont transportés, traités, entreposésetc. Le séchage est classé parmi les meilleurs moyens de conservation des aliments afin de préserver au maximum leurs nutriments, leur saveur, et leur aspect.

Dans le présent travail nous avons étudié l'influence de deux techniques de séchage (Séchage par microonde et séchage dans une étuve sous vide) sur les caractéristiques physicochimiques et les propriétés fonctionnelles de la pomme *Golden délicious* Jaune cultivée dans la wilaya de Batna.

Les résultats les plus intéressants obtenus au terme de ce travail sont:

Pour la cinétique de séchage :

- L'augmentation de la puissance ainsi que l'augmentation de la température à pression constante de séchage engendre une diminution considérable de la durée du séchage.
- Le temps de séchage et l'énergie consommée pour le séchage par microonde sont nettement inférieurs à ceux issus de séchage à l'étuve sous vide. Ceci a certainement un impact sur l'aspect économique.
- Le modèle logarithmique est le plus adéquat pour décrire et présenter les données expérimentales de séchage de la pomme par microonde et à l'étuve sous vide.

Pour les caractéristiques physicochimiques

- La pomme cultivée en Algérie présente des caractéristiques morphologiques et physicochimiques similaires aux autres variétés cultivées au monde.
- La composition chimique de la pomme, a montré qu'elle présente la qualité d'un produit noble, elle est riche en polyphénols, fibre, pectine et vitamine C avec faible apport calorique.
- Selon l'analyse statistique, les paramètres de séchage présentent un effet remarquable sur les propriétés physicochimiques.
- Le séchage par microonde à des puissances assez modérées, 450 et 600 W, enregistre moins des pertes pour les sucres totaux, sucres réducteurs, fibres, pectine, protéines, acidité titrable, polyphénols, flavonoïdes et la couleur.
- Le séchage à l'étuve sous vide montre moins des pertes pour les éléments minéraux (Na, Ca, P et K) et de même pour le pH.

- Concernant les vitamines (α -tocophérol, β -carotène et Acide ascorbique), des résultats comparables ont été enregistrés pour les deux techniques de séchage. Les meilleurs retentions sont obtenus pour la puissance 450W et 55°C/200 mbar .
- L'Analyse factorielle des correspondances (AFC) montre que le profil de la pomme séchée à 600 W est le plus proche de celui de la pomme fraîche; à savoir, les flavonoïdes, les polyphénols, protéines, pectines, sucres et les paramètres de la couleur b^* , a^* , L^* , WI et YI par rapport aux autres paramètres de séchage

Pour les propriétés fonctionnelles :

- La détermination des propriétés fonctionnelles montre que la rétention d'eau est importante et nettement supérieure à celle de l'huile.
- Une excellente solubilité de pomme fraîche et séchée pour tous les paramètres de séchage (supérieur à 80 %). De même pour la stabilité émulsifiante qui dépasse les 80%, alors que la meilleure capacité émulsifiante est observée pour la pomme séchée par microonde.
- La capacité moussante est nulle pour la pomme fraîche et séchée par les deux techniques de séchage.
- La capacité gélifiante de la pomme séchée par microonde atteint les 100% pour les fortes concentrations (16 et 20 %).
- La pomme séchée par microonde enregistre une viscosité importante par rapport à celle séchée à l'étuve sous vide.
- Une faible densité de la pomme séchée par microonde, qui est un avantage au conditionnement et au stockage.
- Des corrélations positives entre les paramètres physicochimiques (Fibre, pectine, polyphénols) et les propriétés fonctionnelles (gélification, émulsification, viscosité, rétention).
- L'Analyse factorielle des correspondances (AFC) montre que la pomme séchée à 600 W est fortement liée à la capacité gélifiante à 8 et 12 % comme elle est liée à la viscosité à différentes concentrations.

De façon générale, la pomme séchée à 600 W peut être utilisée comme matériel tensioactif ou matériel fonctionnel (sucrant, épaississant, émulsifiant) riche en fibres et en polyphénols, incorporable dans des matrices alimentaires.

Enfin, il serait intéressant de faire les suggestions suivantes pour des futures études :

- Approfondir l'étude sur les paramètres influençant les propriétés fonctionnelles (force ionique, pH,...).
- Elargir le champ d'étude sur la microstructure de la pomme et l'étude de profil de certains composants (polyphénols, fibres, pectine) au cours de séchage.
- Optimiser la cinétique de séchage par la combinaison des techniques de séchage, à fin d'avoir les meilleures teneurs en composants biochimiques.
- Faire des essais d'incorporation de la pomme séchée dans des préparations alimentaires.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Aboubakry S., 1975. Modèle d'étude d'une structure de population: Analyse de la variabilité génétique de population naturelle de Mais du Sénégal. Thèse de Doctorat, Université Paris Sud. France, 115 p.
- ACIA, 2009. Agence canadienne d'inspection des aliments. Chapitre 5 : Catégories et normes. Manuel d'inspection des produits-produits transformés. pp 21-28 (<http://www.inspection.gc.ca>. Consulté le 13/06/18)
- Ackermann J., Fischer M. et Amado R., 1992. Changes in sugars, acids and amino acids during ripening and storage of apples. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **40**, 1131-1134.
- Acuna S. P. C., Gil gonzalez J. H., Torres I. D. A., 2010. Physicochemical characteristics and functional properties of vitabosa (*mucuna deeringiana*) and soybean (glycine max). *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, ISSN 0101-2061.
- Adam F., Chien HC., Chung L., Aneta W.J., 2013. Combined Drying of Apple Cubes by Using of Heat Pump, Vacuum-Microwave, and Intermittent Techniques. *Food Bioprocess Technology*, **7**:975-989.
- Adebowale, K.O., Lawal, O.S., 2004. Comparative study of the functional properties of bambarra groundnut (*Voandzeia subterranean*), jack bean (*Canavalia ensiformis*) and mucuna bean (*Mucuna pruriens*) flours. *Food Research International*, **37**:355-365.
- Adrian J., Potus J., Poiffait A., Dauvillier P., 1998. Introduction à l'analyse nutritionnelle des denrées alimentaires. Ed. Tec et Doc. Paris, 254 p.
- AFTER, 2010. Procédure pour la détermination des fibres totales dans les fruits, les légumes et produits dérivés. Chemical analysis FP7 N°245025. Ed. African food tradition revisited by research, pp 39-43.
- Aghilinategh N., Rafiee S., Gholikhani A., Hssienpur S., Omid M., Mohtasebi S. S., Maleki N., 2015. A comparative study of dried apple using hot air, intermittent and continuous microwaves : evaluation of kinetic parameters and physicochemical quality attributes. *Food Science & Nutrition*, **3** (6) : 519-526.
- Aktas T., Ulger P., Daglioglu F., Hasturk F., 2008. Effect of storage time on quality of plum osmotically pretreated with trehalose and sucrose solutions before drying. Proc.

10th International Congress on Mechanization and Energy in Agriculture, Antalya, Turkey, pp 904-909.

- Al Haddad M., 2007. Contribution théorique et modélisation des phénomènes instantanés dans les opérations d'autovaporisation et déshydratation. Thèse de Doctorat en génie de procédés industriels. Université de la Rochelle. France, 211 p.
- Alam M., Gupta K., Khaira H., Javed M., 2013. Quality of dried carrot pomace powder as affected by pre-treatments and methods of drying. *AgricEng Int : CIGR Journal*, **15** (4) :236-243.
- Albagnac P.G., Varoquaux J., Montignac C.I., 2002. Technologies de transformation des fruits. Ed. Tech et Doc. Paris, 498p.
- Albitar 2010. Etude comparative des procédés de séchage couplés à la texturation par Détente Instantanée Contrôlée DIC, en termes de cinétique et de qualité nutritionnelle. Applications à la valorisation des déchets agro-industriels. Thèse de Doctorat en génie des procédés Industriels. Université de la Rochelle. France, 191 p.
- Alias, C., Linden G. (1994). Biochimie alimentaire. 4^{ème} Ed. Masson. Paris, 255p.
- Allaf K., Mounir S., Allaf T., 2012. Swell-drying : Intensification du séchage par DIC. Couplage séchage par convection et DIC - Cas des végétaux. *Revue de Techniques de l'ingénieur, traite Agroalimentaire*, F3005, 18 p.
- Aprifel, 2018. Site internet de l'agence des fruits et des légumes frais. Fiches nutritionnelles par produits : la pomme. (<http://www.aprifel.com/fiches produits>). Consulté le 14/10/2018).
- Asami D.K., Hong Y.J., Barrett D.M., Mitchell A.E. (2003). Comparison of the total phenolic and ascorbic acid content of freeze-dried and air-dried marionberry, strawberry, and corn grown using conventional, organic, and sustainable agricultural practices. *J. Agric. Food Chem.*, **51** : 1237-1241.
- Audigie C., Figarella J., Zonszain F., 1978. Manipulation d'analyse biochimique. Ed. Doin. Paris, 274 p.
- Baharoun T., Gressier B., Trotin F., Brunete C., Dine T., Vasseur J., Gazin J.C., Pinkas M., Luycky M., Gazin, 1996. Oxygen species scavenging activity of phenolic extract from hawthorn fresh plant organs and pharmaceutical preparation. *Arziemittel-forschung*, **46** : 1086-1089.

- Belitz H.D., Grosch W., Schieberle P., 2009. Food chemistry. Ed. Berlin Springer. 4^{ème} réimpression, XLIV, 1070 p.
- Bernard P., 1995. La lyophilisation dans les industries agroalimentaires. Ed. Compagnie française, 149 p.
- Biedrzycka E. et Amarowicz R., 2008. Diet and Health : Apple Polyphenols as Antioxydants, *Food Reviews International*, **24**: 2, 235-251.
- Bimbenet J.J., Bonazzi C., Dumoulin E., 2002. Séchage, cuisson, cuisson-extrusion. In : Bimbenet JJ et Duquenoy A., Trystram G. Génie des procédés alimentaires. Ed. DUNOD. Paris, pp 391-426.
- Bimbenet J.J., 1984. Le séchage dans l'industrie agricole et alimentaire. Dans les Cahiers du Génie Industriel Alimentaire (GIA). 2^{ème} Ed. SEPAIC. Paris, 34 p.
- BINDER GmbH, 2014. Mode d'emploi. Etuve de séchage sous vide. Version 12/2014. N° de référence 7001-0125. 89p.
- Bogdanski K.A., 1965. Diverses méthodes de dosage de la vitamine. Ed. Springer. Pologne, pp 227-236.
- Boizot N., Charpentie J.P., 2006. Méthode rapide d'évaluation du contenu en composés phénoliques des organes d'un arbre forestier. Cahier des techniques de l'INRA. pp 79-82.
- Boudabous, M., Ben Marzouk, I., Marzougui, N., Lechiheb, B, Ben Yahia, L. and Ferchichi A., 2013. Physicochemical Characterization of the Local Apple Cultivar 'Douce de Djerba' Compared with Introduced Cultivars in Tunisia. *Acta Horticultura*, **997**:117-128.
- Boudabous, M., Ben Marzouk, I., Lechiheb, B, Ben Yahia, L. and Ferchichi A., 2015. Phenolic compound and antioxidant activity of the Douce de Djerba apple compared to introduced cultivars grown in Tunisia. *Journal of New science*, **24** (2) : 1091-1097.
- Bouhier R., 1983. La pomme culture et débouchés. Ed. Flammarion. France. P 361.
- Boulckbache L., 2005. Profil GC-MS des polyphénols d'une plante médicinale: *Eucalyptus globulus*. Mémoire de Magister. Université de Bejaia. 71 p.
- Bourgeois C.F., 2003. Les vitamines dans l'industrie agroalimentaire. Ed. Tech et Doc. Paris, 708 p.

- Boyer J., Liu R.H., 2004. Apple phytochemicals and their health benefits. *Nutrition journal*, **3** (5) :1-5.
- Brennan J.G., 2006. Food processing handbook. Ed. WILEY-VCH Verlag GmbH et Co-KGaA, Weinheim. Germany, 602 p.
- Bretaudeau J., 1978. Atlas d'arboriculture fruitière. Poirier, pommier. Vol. 2. 2^{ème} Ed. J. B. Bailliere et Fils. Paris, 173 p.
- Bretaudeau J., Fauré Y., 1992. Atles d'arboriculture fruitière. Ed. Tec et Doc. Paris, 234p.
- Brossard, 1997. Mémento fruits et légumes. 5^{ème} Ed. Paris, 375 p.
- Brown M., Janick J., Cummins J.N., Hemmat S.K., 1996. Apples. In: Janick J., Moore J.N. Fruit Breeding. Vol. 1. Eds. Wiley, New York, pp 1-77.
- Caprez A., Arrigoni E., Amado R., Neukom H., 1986. Influence of different Types of thermal treatment on the chemical composition and physical properties of Wheat Bran. *Journal of Cereal Science*, **4** :233-239.
- Casquete R., Castro S.M., Villalobos M.C., Serradilla M.J., Queiros R.P., Saraiva J.A., Cordoba M.G., Teixeira P., 2014. High pressure extraction of phenolic compound from citrus peels. *High pressure research*, **34** (4) : 447-451.
- Cengel Y.A., 2002. Heat transfer : A partical approach. 2^{ème} Ed. Tec et Doc. Paris, 363 p.
- Chakraverty A., 2003. Conversion and utilization of biomass. In : Ramaswamy H.S., Raghavan G.S.V., Chakraverty A., Mujumdar A.S. Handbook of postharvest technology : Cereals, fruit, vegetables, tea, and spices. Eds. Marcel Dekker. New York, pp797-819.
- Charreau A., Cavailé R., 1995. Séchage théorie et calcules. *Revue de Technique de l'Ingénieur, traite Agroalimentaire*, J 2480, 21 p.
- Cheftel J.C., Cheftel J., Besancon P., 1979. Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments. Vol. 2. Ed. Tec et Doc- Lavoisier. Paris, 420 p.
- Chong C.H., Chung chong C.H., 2013. Colour phenolic content and antioxidant capacity of some fruits de hydrated by a combination of different methods. *food chemistry*, **141**:3889-3896.

- Chong C.H., Figiel A., Chung L.L., 2014. Combined drying of apple cubes by using of heat pump, vacuum-microwave, and intermittent techniques. *Food bioprocess technology*, **7**(4):975-989.
- CIQUAL, 2017. La table française de référence sur la composition nutritionnelle des aliments. Ed. anses. France. (www.ansespro.fr/TableCIQUAL/). Consulté le 12/11/2018).
- Cloutour F., 1995. Caractéristiques de fibres alimentaires: influence sur la fermentation in vitro par la flore digestive alimentaire. Thèse de Doctorat, Université de Nantes. France, 123 p.
- Coffman, C.W. et Garcia, V.V., 1977. Functional properties and amino acid content of protein isolate from mung bean flour. *Journal of Food Technology*, **12**:473-484.
- Colas, B. (2003). Propriétés structurantes de l'eau dans les légumes et dans les fruits. In : Meste, M., Lorient, D., Simatos, D. Ed.Tec and Doc. Lavoisier. Paris, 674 p.
- Colin-Henrion M., 2008. De la pomme à la pomme transformation : impact du procédé sur deux composition d'intérêt nutritionnel ; caractérisation physique et sensorielle des produits transformation. Thèse de Doctorat. Université d'Angers. France, 255 p.
- Colin-Henrion M., Mehinagic E., Renard C., Richomme P., Jourjon F., 2009. From apple to apple sauce: Processing effects on dietary fibres and cellwall polysaccharides. *Food Chemistry*, **117**(2):254-260.
- Combes P.F., 1995. Micro-ondes, lignes, guides et cavités, cours et exercices. 2^{ème} cycle universitaire. Ecole Polytechnique. Université de Nante. France, 63p.
- Constenla D., Lozano J.E., 2003. Kinetic model of pectin demethylation. *Latin American Applied Research*, **33**:91-96.
- Couarraze G., Grossiord J.L., 2000. Initiation à la rhéologie. 3^{ème} Ed. Tec et Doc-Lavoisier, 300 p.
- Crozier A., Jaganath I.B., 2009. Dietary phenolics: chemistry, bioavailability and effects on health. *Journal of Royal Society of Chemistry*, **26**:1001-1043.
- Cuccurulo G., Giordano L., Metallo A., Cinquanta L., 2018. Drying rate contrôle in microwave assisted processing of sliced apples. *Journal of Biosystems engineering*, **170**:24-30.
- Curet S., 2008. traitement microonde et transferts de chaleur en milieu multiphasique.

Thèse Doctorat en génie de procédé. Université de Nantes, 196 p.

- Demigné C., Guyot S.V., Kelner-Vayasse J.J.P., Ripetti-Ballester D., Aprikian O., Manach C., Morand C., 2003. Le rôle des différents nutriments et de leurs possibles interactions dans les effets santé de la pomme. *Journal of Fruits*, **58**(5):297-306.
- Deymié B., 1974. Technique d'analyse et de contrôle dans les industries agroalimentaire. Ed. Tec et Doc-Lavoisier. Vol. 4. Paris, 988 p.
- Diaz J.V., Anthon G.E., Barrett D.M., 2009. Conformational changes in serum pectin during industrial tomato pate production. *Journal of agricultural and food chemistry*, **57**(18):8453-8458.
- Djendoubi F., 2012. Etude cinétique et optimisation multicritères du couplage Déshydratation Imprégnation par Immersion-séchage convectif de la poire, la pomme et l'abricot. Thèse Doctorat en Génie des Procédés Alimentaires. ParisTech, 219 p.
- Djerroud D., 2010. Modélisation markovienne de séchage continu par contact avec agitation. Thèse de Doctorat en Génie des procédés et de l'Environnement. Université de Toulouse. France, 172 p.
- DSA Batna, 2018. Données statistiques sur le pommier. Direction des services agricoles de la wilaya de Batna.
- Duchene-Massias A., 2015. Valorisation fonctionnelle et antioxydante des épidermes de pommes *Golden delicious*, Thèse de Doctorat en chimie physique. Université Bordeaux. France, 256 p.
- Dumont E., 2010. Pépiniériste et la pomme. Ed. Castor et Pollex, pp 11-12.
- Eberhardt M.V., Lee C.Y. et Liu R.H., 2000. Antioxidant activity of fresh apples. *Journal of Nature*, **405**:903-904.
- Espiard E., 2002. Introduction à la transformation industrielle des fruits. 2^{ème} Ed. Tec et Doc-Lavoisier. Paris, 360 p.
- Espinosa-Brisset L.C., 2012. Texture de la purée de pomme : influence de la structure sur les propriétés rhéologiques et la perception sensorielle-effet du traitement mécanique. Thèse de Doctorat en Sciences et Procédés des Aliments. Agro ParisTech. France, 200 p.
- Fahloul D., Benmadi F., Boudraa S., 2009. Estimation de la diffusivité massique et

cinétique de séchage sous vide de la pomme de terre (variété *Spunta*). *Revue des Energies Renouvelables*, **12** (4) : 655- 665.

- Falleh H., Ksouri R., Chaieb K., Karray-Bouraoui N., Trabelsi N., Boulaaba M., Abdelly C., 2008. Phenolic composition of *Cynara cardunculus* L. organs, and their biological activities. *Comptes Rendus Biologies*, **331** (5):372-379.
- FAO Stat., 2015. Agro-statistics Database. Ed. Food and Agriculture Organisation of the united Nations. Rome. (<http://www.faostat.fao.org/>. Consulté le 18/05/2018).
- FAO Stat., 2017 Agro-statistics Database. Ed. Food and Agriculture Organisation of the united Nations. Rome. (<http://www.faostat.fao.org/>. Consulté le 20/09/2018).
- FAO., 2004. Les caractéristiques physicochimiques des solutions. FAO. Rome, pp 1-4.
- Farhat A., 2010. Vapo-Diffusion assistée par micro-ondes : Conception, optimisation et application. Thèse Doctorat en science des procédés, sciences des aliments. Université d'Avignon et des pays de Vaucluse et l'école national d'ingénieurs de Gabès, 136 p.
- Fernandez-Kim S.O., 2004. Physicochemical and functional properties of crawfish chitosan as affected by different processing protocols. Thèse Master en science. Université de l'Etat de Louisiane, 99 p.
- Ferretti G., Turco I., Bacchetti T., 2014. Apple as a source of dietary phytonutrients bioavailability and evidence of protective effects against human cardiovascular disease. *Food and nutrition Science*, **5**:1234-1246.
- Foucard T., 1985. Analyse factorielle programmation sur micro-ordinateur. 2^{ème} Ed. Masson, 233 p.
- Fournier D., 2003. Conservation des aliments. Université Laval. Canada, 16 p.
- Gillard S., 2009. Les dihydrochalcones de la pomme : extraction, séparation et intérêt médical. Thèse de Doctorat en pharmacie. Université de Strasbourg, 140 p.
- Goodman C.L., Fowcett S. Barringer S.A., 2002. Flavor, viscosity, and color analyses of hot and cold break tomato juice. *Journal of Food sciences*, **67**(1):404-408.
- Hassan Abou Elhana N., 2008. Microwave drying of apple. *Misr Journal of agricultural engineering*, **(3)**:980-1003.
- Hasturk S., Aktas T., Orak H., Ulger P., 2011. Influence of Pretreatments and Different

- Drying Methods on Color Parameters and Lycopene Content of Dried Tomato. *Bulgarian Journal of Agricultural Science, Agricultural Academy*, **17**(6):867-881.
- Hellier R., Esnault R. Et Lance C., 2000. Formation des fruits et des graines. Dans physiologie végétale.2-Développement. Ed. Dunod, pp220-239.
 - Hill J.M., 1996. Modelling microwave heating. *Journal of Applied Mathematical Modelling*, **20**:3-15.
 - Horuz E., Bozkurt H., Karatas H., Maskan M., 2017. Effet of hybrid (microwave – conventionnal) and convectional drying on drying kinetic, total phenolic, antioxidant capacity, vitamin C, color and rehydration. *Journal of Food chemistry*, **230**: 295-305
 - ITAFV, 2002. Création et conduite d'un verger de pommier. Document de vulgarisation. Institut technique de l'arboriculture fruitiers et de la vigne. Alger, 115 p.
 - Johnston, C. et Haie, J., 2005. Oxidation of ascorbic acid in stored orange juice is associated with reduced plasma vitamin C concentrations and elevated lipidperoxides. *Journal of the American Dietetic Association*, **105** (1):106-109.
 - Kalkisim O., Ozdes D., Okcu Z., Karabulut, B. et Senturk, H. B., 2015. Determination of Pomological and Morphological Characteristics and Chemical Compositions of Local Apple Varieties Grown in Gumushane, Turkey. *Journal of Erwerbs-Obstbau*, **58**(1):41-48.
 - Kaushal B.B., Sharma P.C., 1995. Apple. In: Salunkhe D.K. Handbook Fruit. Eds. Science and Technology. INC, New York, Basel, pp 91-122.
 - Kermani Z.J., Shpigelman A., Pham H.T., Van Loey A.M., Hendrickx M.E., 2015. Functional properties of citric acid extracted mango peel pectin as related to its chemical structure. *Journal of Food Hydrocolloids*, **44**: 424-434.
 - Kogan A., Garti N., 2006. Microemulsions as transdermal drug delivery vehicles. *Advances in Colloid and Interface Science*, **123**:369-385.
 - Kone K.Y., 2011. Amélioration de la qualité de la tomate sèche par micro-onde assiste par air chaude avec pilotage de la puissance spécifique. Thèse de Doctorat en Sciences et procédés des aliments. Agro Paris Tech, 169 p.
 - Kratchanova M., Palvlova E., Panchev I. 2004. The effect of microwave heating of fresh orange peels on the fruit tissue and quality of extracted pectin. *Journal of Carbohydrate Polymers*, **56** (2):181-185.

- Kunzek, H., Kabbert, R., Gloyna, D., 1999. Aspects of material science in food processing: changes in plant cell walls of fruits and vegetables. *Z Lebensm Unters Forsch A*, **208** : 233-250.
- Lacoste S., 2008. Les aliments qui guérissent. Des réservoirs de vitamines et d'oligoéléments. Légumes et fruits, de vrais médicaments. Ed. Leduc. s. Paris, 299 p.
- Lafon J.P., Tharaud-Payer C., Levy G., 1996. Biologie des plantes cultivées. Tome 1. Ed. Lavoisier. Paris, 227 p.
- Laguerre M., Lopez-Giraldo L., Lecomte J., Pina M., Villeneuve P., 2007. Outils d'évaluation in vitro de la capacité antioxydante. *Oxford College of London*, **14**(5): 278-292.
- Lahmari N., Fahloul D., Azani I., 2012. Influence des méthodes de séchage sur la qualité des tomates séchées (variété Zahra), *Revue Des Energies Renouvelables*. **15**(2):285- 295.
- Lamonarca F., 1985. La culture des arbres fruitière. Ed. Vecchi S. A. Paris, 221 p.
- Lavelli N. et Corti S., 2011. Phloridzin other phytochemicals in apple pomale : stability evaluation upon dehydration and storage of dried product. *Journal of Food chemistry* **129** :1578-1583.
- Lecoq R. 1965. Manuel d'analyse alimentaire et expertise usuelle. Vol. 1. Ed Doin. Paris, 1025 p.
- Linden G., 1984. Techniques d'analyse et de contrôle dans les industries agro alimentaires. Principes des techniques d'analyses. Tome 2. Ed. Collection Sciences et Techniques Agroalimentaires, 548 p.
- Linden G., Lorient D., 1994. Biochimie agro-industrielle. Valorisation alimentaire de la production agricole. Ed. Masson. Paris, Milan, Barcelone, 359 p.
- Lo C.M., Grun I.U., Taylor T.A., Kramer H., Fernando L.N., 2002. Blanching effects on the chemical composition and the cellular distribution of pectins in carrots. *Journal of Food Science*, **67**:3321-3328.
- Lopez A., Rodriguez-Ramirez J.R., Mendez-Lagunos L.L., 2012. Effects of drying air temperature on the structural properties of garlic evaluated during drying. *International Journal of Food Properties*, **16**:1516 -1529.

- Lorient D., 2003. Modification biochimique des constituants alimentaires. *Revue de Techniques de l'Ingénieur, traite Agroalimentaire*, F3400, 19 p.
- Lorient, D., Colas, B., Le meste M., 1988. Propriétés fonctionnelles des macromolécules alimentaires. Notebooks de ENS. BANA. N°6. Ed. Tec et doc-Lavoisier. Paris, 268 p.
- Lu M., Yuan B., Zeng M., Chen J., 2011. Antioxidant capacity and major phenolic compound of spices commonly consumed in china. *Food research international*, **44** : 530-536.
- Lucchesi M.E., 2005. Extraction sans solvant assistée par micro-ondes conception et application à l'extraction des huiles essentielles. Thèse de Doctorat. Université de la Réunion. France, 146 p.
- MacDougall D.B., 2002. Color in food Improving quality. Ed. Woodhead Publishing Limited and CRC Press, LLC, 376 p.
- Mafart P., 1996. Génie industriel alimentaire. Procédés physiques de conservation. Tome 1. 2^{ème} Ed Tec et Doc-Lavoisier. Paris, pp 235-326.
- Mansouri A., Guendez E., Kokkalou E. et Kefalas P., 2004. Phenolic profile and antioxidant activity of Algerian ripe date palm fruit (*Phoenix dactylifera*), *Journal of Food Chemistry*, **89**:410-420.
- Manual of Weighing Applications. Density, 2016. In: sartorius Handbook of Weighing Applications Balances and Scales Used as Measuring and Test Equipment in a Quality System, pp 1-62.
- Manzoor, M., Anwar, F., Saari, N. and Ashraf M., 2012. Variations of antioxidants characteristics and mineral contents in pulp and peel of different apple (*Malus domestica* Borkh.) cultivars from Pakistan. *Molecules*, **17**:390-407.
- Marcon M.V., Vriesmann L.C., Wosiacki G., Beleski-Carneiro E., Petkowicz C.L.O., 2005. Pectins from apple pomace. *Polimeras: Ciência e Tecnologia*, **15**(2):127-129.
- Margarita M., Vega-Gálvez A., Lopez J., Parada G., Sanders M., Aranda M., Discala E. K., 2010. Impacte of air-drying temperature on nutritional properties, total phenolic content and antioxidant capacity of quinoa seeds (*Chenopodium quinoa* willd) *Industrial crops and products*, **32** : 258-263.
- Marlène F. Vierling E., 2001. Biochimie des aliments diététique du sujet bien portant.

2^{ème} Ed. Pays-Bas. 285 p.

- Martin P., Gagnard N., Drouinrau G., 1984. L'analyse végétale dans le contrôle de l'alimentation des plantes tempérées et tropicales. Ed. Lavoisier. Paris, 782p.
- Maskan M., 2000. Séchage aux micro-ondes/aérosols et micro-ondes de bananes. *Journal of Food Engineering*, **44**:71-78.
- Maskan M., 2001. Drying, Shrinkage and rehydration characteristics of Kiwi fruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, **48**:177-182.
- Massiot P., Renard C.M., 1997. Composition, physico-chemical properties and enzymatic degradation of fibres prepared from different tissues of apple. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie*, **30**:800-806.
- McCeady R.M., 1970. Pectin, methods. In : Food analysis. Joslyn M.A. 2^{ème} Ed. Academic Press .New-York, London, pp565-599.
- Midilli, A., Kucuk, H., Yapar Z. 2002. A New model for single-layer drying. *Drying Technology*, **20**(7):1503-1513.
- Miller, G.L., 1959. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Analytical Chemistry*, **31**:426-428.
- Miranda M., Vega-galvez A., Lopez E., Parado G., Sanders M., Aranda M., Uribe E., Di scala K., 2010. Impact of air-drying temperature on nutritional properties, total phenolic content and antioxidant capacity of quinoa seeds. *Industrial crops and products*, **32**:258-263.
- Moreiras T.O., Carbajal Á., Cabrera Forneiro L., Cuadrado Vives C., 2004. Tablas de composición de alimentos. Ed. Pirámide Ediciones. Madrid. Espagne, 144 p.
- Multon J. L., 2002. Additifs et auxiliaires de fabrication dans les industries agroalimentaires. 3^{ème} Ed. Collection Sciences et Techniques Agroalimentaires. Londres, 746 p.
- Nathakarankul A., Jaibson P., Ronnarit S., 2010. Far-infrared radiation assisted drying of longan fruit. *Food Engineering*. **100**:662-668.
- NF V 05-101, 1974. Produit dérivés des fruits et légumes. Détermination de l'acidité titrable. Ed. AFNOR, Paris, pp 44-47.
- NF V 05-108, 1970. Produit dérivés des fruits et légumes-jus de fruits. Détermination

de pH. Ed. AFNOR, Paris, 325 p.

- Nguyen TC., 2015. Étude expérimentale et modélisation du procédé de séchage des végétaux. Thèse Docteur en Science l'Ingénieur. Université de Bretagne-sud. France, 237 p.
- Noui Y., 2016. Fabrication et caractérisation des produits alimentaires élaborés à base de dattes (*Phoenix dactylifera* L.). Thèse de Doctorat. Université de Batna 1. Algérie, 161 p.
- Nour V., Trandafir I., Ionica M.E., 2010. Compositional Characteristics of Fruits of several Apple (*Malus domestica* Borkh.) Cultivars. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, **38**(3):228-233.
- Ouden D., Vliet V., 1997. Particule size distribution in tomato concentrate and affects on rheological properties. *Journal of Food Science*, **62**(3):565-567.
- Pathare P.B., Umezuruike Linus Opara U.L., Fahad Al-Julanda Al-Said F., A., 2013. Colour Measurement and Analysis in Fresh and Processed Foods: A Review. *Food Bioprocess Technol.*, **6**:36-60.
- Ptichkina N.M., Markina O.A., Rumyantseva G.N., 2008. Pectin extraction from pumpkin with the aid of microbial enzymes. *Journal of Food Hydrocolloids*, **22**:192-195.
- Raharitsifa N., 2008. Optimisation de la lyophilisation du jus de pomme en tapis de mousse. Thèse Doctorat en science et technologie des aliments. Université Laval. P 277.
- Redout A.C. 2002. Rhéologie et analyse de texture des aliments. Ed. Tec et Doc. Paris, 199p.
- Renard C., Dupont N. Guillermin P., 2007. Concentrations and characteristics of procyanidins and other phenolics in apples during fruit growth. *Journal of Phytochemistry*, **68**(8):1128-1138.
- Revuz B.M., 1979. Microbiology and food industry. Tome 3. Ed. APRIA. Paris, pp 113-121.
- Robards K., Prenzler P. D., Tucker G., Swatsitang P. ET Glover W., 1999. Phenolic compounds and their role in oxidative processes in fruits. *Journal of Food*

Chemistry, **66**:401-436.

- Romain J., Thomas C., Pierre S., Gérard B., 2002. *Science des aliments*. Vol 2. Ed. Lavoisier. Paris, 453p.
- Roudot A.C., 2001. Rhéologie et analyse de texture des aliments. Ed. Tec et Doc. Paris. 152 p.
- Saidou C., 2012. Propriétés physico-chimique et fonctionnelles des gomme hydrocolloïdes des écorces de *Triumfeya cordifolia* (Tiliacée) et *bidellia hermifolia* (Euphrbiacée). Thèse Doctorat. Université de Grenoble. France, 235 p.
- Saravacos G. D., 1995. Drying food engineering properties of food. Ed. H et RAO M.A. New York, Marcel Dekker, pp223-309.
- Schmidt U.S., Schmidt K., Kurz T., Endreß H.U., Schuchmann H.P., 2015. Pectins of different origin and their performance in forming and stabilizing oil-in-water-emulsions. *Journal of Food Hydrocolloids*, **46**:59-66.
- Schuhmacher C., 2002. Agents antimousse. In : Malton J. L. (Ed). Additif et auxiliaires de fabrication dans les industries agroalimentaires. 3^{ème} Ed. Lavoisier. Paris, pp509-532.
- 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**: 426-433.
- Shyam S. S., Shafuir R. M., 2007. Pore formation selected foods as a fonction of shelf temperature during feeze drying. *Journal of Drying Technology*, **20**(7):1379-1391.
- Sila D.N., Smout C., Vu S.T., Loey A., Hendrickx M., 2005. Influence of pretreatment conditions on the texture and cell wall components of carrots during thermal processing. *Journal of Food Science*, **70**:85-99
- Silva F.O., 2005. Total ascorbic acid détermination in fresh scpieezed orange juice by gas chromatography, *Journal of Food Control*, **16**(1):55-58.
- Simmonds, M, Howes, M.J.R., 2016. Profil of compounds in different cultivars of apple (*Malus domestica*). In: Nutritional composition of fruit cultivars. Ed. Elsevier, pp 1-18.
- Siti Zaharah S., RAZI I. M., 2009. Growths, stomata aperture, biochemical changes

and branch anatomy in mango (*Mangifera indica*) cv. Chokanan in response to root restriction and water stress. *Journal of Scientia Horticulturae*, **123**(1): 58-67.

- Spataru S.C. Alexa I.C., Funaro L., 2007. Influence of drying on the composition of several apple varieties. *Scientific study and research*, **4** :445-450.
- Suzan E. Gebhardt D., Robin G., Thomas R., 2002. Nutritive Value of Foods. Ed. USDA. Washington, 97 p.
- Thebaudin J.Y., Lefebvre A.C., Harrington M.E., Bourgeois C.M., 1997. Dietary fibres: nutritional and technological interest. *Trends in Food Science and Technology*, **8**:41-48.
- Tilly G., 2010. Pectines. *Techniques d'Ingénieurs, traite agroalimentaire*, F5000, 10p.
- Toğrul, I.T., Pehlivan D., 2002. Mathematical modeling of solar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering*, **55**:209-216.
- Touati B., 2008. Étude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe vert (*Menta viridis*). Thèse de Doctorat de l'I.N.S.A de Lyon et l'Université Abou-Bekr Belkaid. Tlemcen, 124 p.
- Turk M., 2010. Vers une amélioration du procédé industriel d'extraction des fractions solubles de pomme à l'aide de technologies électriques. Thèse de Doctorat en génie des procédés industriels. Université de Technologie Compiègne. 142 p.
- USDA. (2004). National Nutrient Database. (<http://www.nal.usda.gov/fnic/foodcomp/>). Consulté le 24.11.2017).
- Vachet L., 1993. Séchage des industries chimiques. *Technique d'ingénieur, traite Opérations unitaires - Génie de la réaction chimique*, J2483, 11 p.
- Vega-Galvez A., Ah-Hen K., Chacana M., Vergara J., Martinez-Monzo J., Garcia-Segovia P., LemusMondaca R., Di Scala K., 2012. Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, colour, texture and microstructure of apple (var. *Granny Smith*) slices. *Journal of Food Chemistry*, **132**:51-59.
- Verdu C., 2013. Cartographie Génétique des Composés Phénoliques de la pomme. Thèse de Doctorat en Biologie Cellulaire et moléculaire végétale Université d'Angers. 208 p.

- Villano D., Fernandez-Pachon M.S., Moya M.L., Troncoso A.M., Garcia-Parilla M.C., 2007. Radical scavenging ability of phenolic compounds towards DPPH free radical. *Journal of Talanta*, **71**:230-235.
- Vincent L., 2006. Séchage du bois. Profile technologique. Université Laval, Canada. (http://www.valuetowood.ca/imports/pdf/fr/profil_tech/TP-06VLavoie_S%E9chage_Francais.pdf. Consulté le 06/02/2017).
- Wang X., Chen Q., Lü X., 2014. Pectin extracted from apple pomace and citrus peel by subcritical water. *Journal of Food Hydrocolloids*, **38**:129-137.
- Wang Z., Sun J., Chen F., Liao X., Hu X., 2007b. Mathematical modeling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying. *Journal of Food Engineering*, **80**:536-544.
- Wang Z., Sun J., Liao X., Chen F., Zhao G., Wu J., Hu X., 2007a. Mathematical Modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. *Food Research International*, **40**:39-46.
- Wilhem L.R. Suter D.A. Brusewitz G.H., 2005. Food and process Engineering technology. Ed. American society of agricultural Engineers. 303 p.
- Wojdyło A., Oszmiański J., Laskowski P., 2008. Polyphenolic compounds and antioxidant activity of new and old apple varieties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **56**(15):6520-6530.
- Yan H., Kerr W.L., 2013. Phenolics content, Anthocyanins, and Dietary Fiber Content of apple pomace powders produced by vacuum-bet drying. *Journal of the science of food and agriculture*, **93** :1499 -1504.
- Yen Y.H., Shih C.H., Chang C.H., 2008. Effect of adding ascorbic acid and glucose on the antioxidative properties during storage of dried carrot, *Journal of Food Chemistry*, **07**(1):265-272.

Annexe 1

1. Préparation de la gamme étalon de sucres totaux

• Les réactifs

- Solution mère de glucose : une concentration de 1 mg/mL
- Solution de phénol, à 5 %.
- Acide sulfurique concentré, à 98 %.

• La gamme étalon

- À partir de la solution mère, préparer la gamme d'étalonnage comme il est indiqué dans le tableau 1
- Lire la densité optique que DO à 485 nm et tracer la courbe DO – f(C).

Tableau 1: Gamme étalon du glucose pour les sucres totaux.

Volume de phénol à 5% (ml)	0,5	0,5	0,5	0,5
Volume d'acide sulfurique à 98% (ml)	3	3	3	3
Volume de la solution de glucose (ml)	0	0,5	1	1,5
Concentration en glucose C (mg/ml)	0	0,05	0,1	0,15
Densité optique (nm) à	0	0,24	0,39	0,56

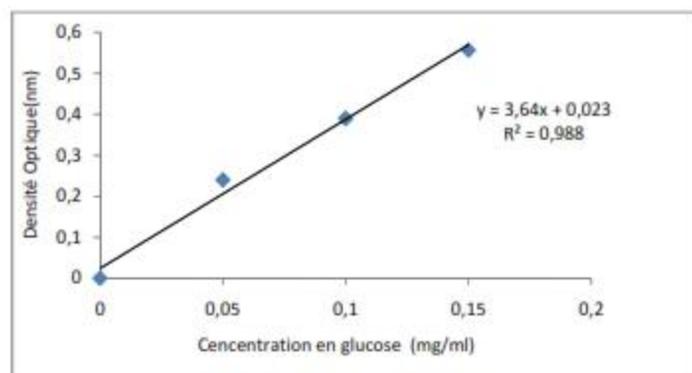


Figure 1 : Courbe d'étalonnage de glucose pour le dosage des sucres totaux.

2. Préparation de la gamme étalon des sucres réducteurs

• Les réactifs

- Solution du glucose : une concentration de 10 mg/mL;
- Réactif de DNS (Acide di-nitro-3,5 salicylique) : 8 g de soude, 1g d'acide di-nitro-3,5 salicylique et 30 g de tartrate double de sodium et de potassium, sont dissouts dans un peu d'eau distillée, puis compléter le mélange à 100 mL). Le réactif de DNS doit se conservé à l'abri de la lumière.

- **La gamme étalon**

- À partir de la solution mère, préparer la gamme d'étalonnage comme il est montré dans le tableau 2.
- Lire la densité optique DO à 540 nm et tracer la courbe $DO = f(C)$.

Tableau 2. Gamme étalon de glucose pour les sucres réducteurs

Réactif de DNS (ml)	1	1	1	1	1
Eau distillée (ml)	10	9,5	9	8,5	8
Volume de la solution de glucose (ml)	0	0,5	1	1,5	2
Concentration en glucose C (mg/ml)	0	0,5	1	1,5	2
Densité optique (nm)	0	0,24	0,41	0,58	0,76

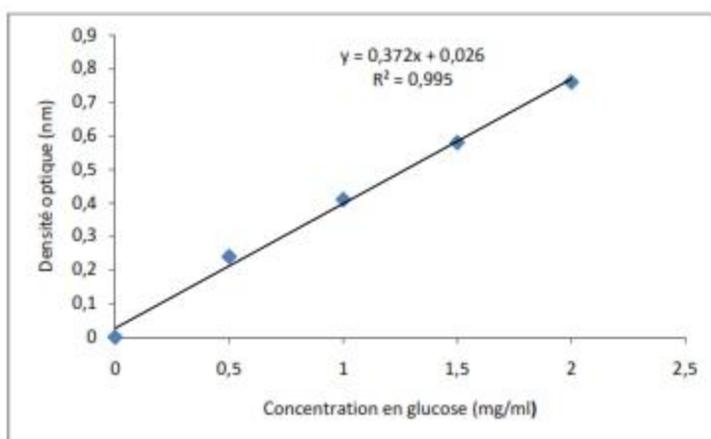


Figure 2. Courbe d'étalonnage du glucose pour le dosage des sucres réducteurs.

3. Préparation de la gamme étalon des polyphénols totaux

- **Les réactifs**

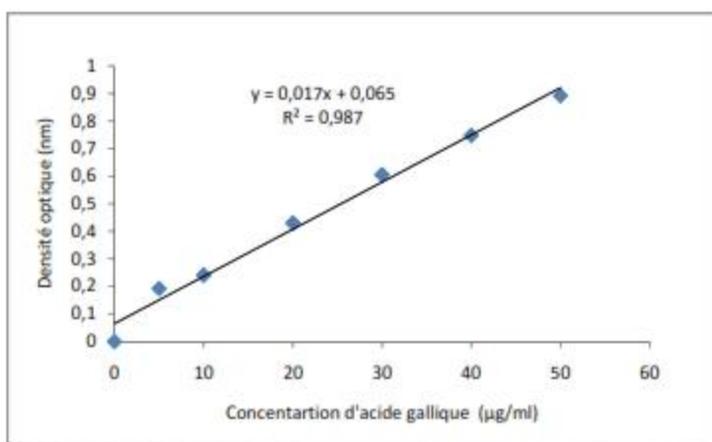
- Solution mère d'acide gallique avec une concentration de 1mg/mL
- Réactif de Folin-Ciocalteu's
- Solution de carbonate de sodium à 7,5 %.

- **La gamme étalon**

- À partir de la solution mère, préparer la gamme d'étalonnage comme le montre le tableau 3.
- Lire la densité optique DO à 765 nm et tracer la courbe $DO = f(C)$.

Tableau 3: Gamme étalon des polyphénols totaux

Solution d'acides gallique (μl)	0	2	40	80	120	160	200
Méthanol (μl)	200	180	160	120	80	40	0
Réactif de Folin-Ciocalteu (ml)	1	1	1	1	1	1	1
Solution de carbonate de sodium (μl)	800	800	800	800	800	800	800
Concentration d'acide gallique ($\mu\text{g/ml}$)	0	5	10	20	30	40	50
Densité optique (nm)	0	0,192	0,241	0,43	0,605	0,748	0,892

**Figure 3 :** Courbe d'étalonnage de l'acide gallique pour le dosage des polyphénols totaux

4. Préparation de la gamme étalon des flavonoïdes

- **Réactifs :**

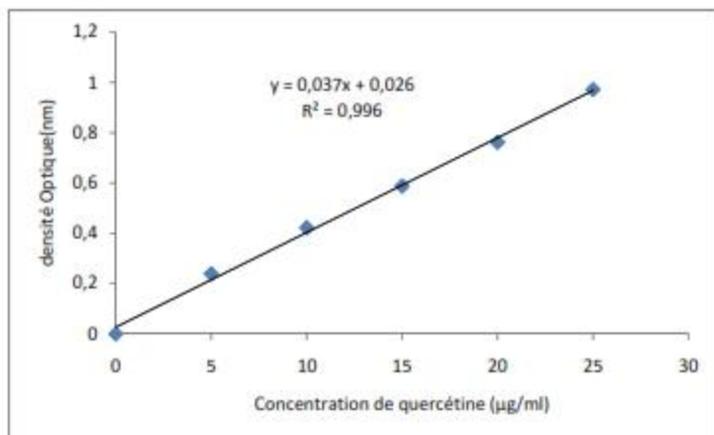
- Solution de quercétine (25 $\mu\text{g/ml}$)
- Méthanol pur
- Solution de chlorure de fer (FeCl_3), à 2 %.

- **La gamme étalon**

- À partir de la solution mère, préparer la gamme d'étalonnage comme il est mentionné dans le tableau 4.
- Lire la densité optique DO à 430 nm et tracer la courbe DO - $f(C)$.

Tableaux 4 : Gamme étalon des flavonoïdes

Solution de quercétine (μl)	0	400	800	600	800	1000
Méthanol (μl)	1000	800	600	400	200	0
Solution de AlCl_3 (ml)	1	1	1	1	1	1
Concentration de quercétine ($\mu\text{g/ml}$)	0	5	10	15	20	25
Densité optique (nm)	0	0,239	0,422	0,588	0,762	0,972

**Figure 4 :** Courbe d'étalonnage de la quercétine pour le dosage des flavonoïdes.

5. Préparation de la gamme étalon de α -tocophérol et β -carotène

- **Réactifs**

- Solution mère de α -tocophérol à 55 ppm.
- Solution mère de β -carotène à 55 ppm.
- Préparer le réactif en mélangeant :
 - 0,1 ml de Ferricyanure de potassium à 1%
 - 0,1 ml de Chlorure ferrique à 1,5 %
 - 1,5 ml de Chloroforme
 - 8,5 ml d'éthanol à 96°.

- **La gamme étalon**

- À partir de la solution mère, préparer la gamme d'étalonnage pour chaque vitamine comme il est mentionné dans les tableaux 5 et 6.
- Lire la densité optique DO à 510 nm pour le α -tocophérol et 450 nm pour le β -carotène et tracer les courbes $\text{DO} = f(C)$.

Tableau 5: Gamme étalon de α -tocophérol

Solution de α -tocophérol (ml)	0	0,10	0,20	,30	0,40	0,50
Chloroforme (ml)	0,5	0,4	0,30	0,20	0,10	0
Réactif (ml)	5	5	5	5	5	5
Concentration en α -tocophérol (ppm)	0	1	2	3	4	5
Densité optique à 510nm	0	0,05	0,07	0,12	0,15	0,19

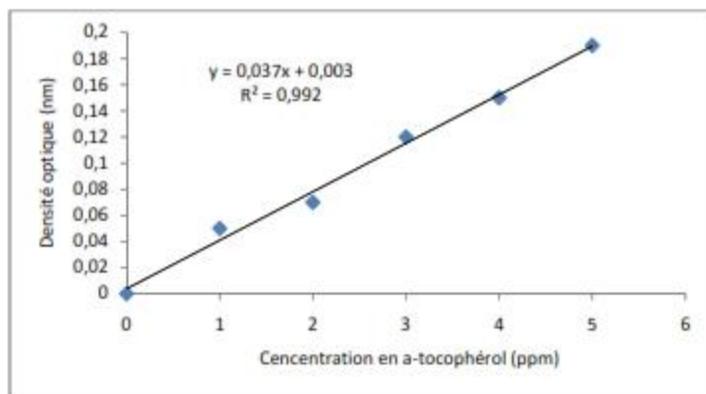


Figure 5 : Courbe d'étalonnage de α -tocophérol.

Tableau 6 : Gamme étalon du β -carotène

Solution de β -carotène (ml)	0	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50
Chloroforme (ml)	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10	0
Réactif (ml)	5	5	5	5	5	5
Concentration en β -carotène (ppm)	0	1	2	3	4	5
Densité optique à 450 nm	0	0,10	0,25	0,31	0,35	0,44

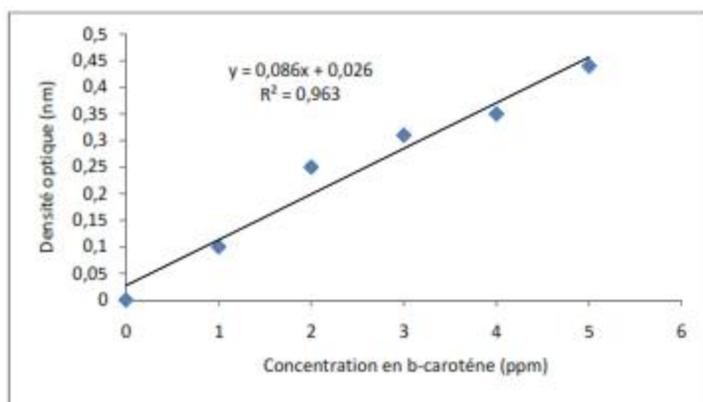


Figure 6 : Gamme étalon de β -carotène

• **Préparation des gammes étalon des minéraux P, K Na, Ca.**

- Préparer des solutions mère à 100 ppm, pour chaque élément de Na (par NaCl), K (par KCl), Ca (par CaCO₃) et P(KH₂PO₄).
- À partir de la solution mère, préparer la gamme d'étalonnage comme le montre les tableaux 7, 8, 9 et 10.
- Lire la densité optique pour chaque élément et tracer les courbes DO – f(C).

Tableau 7: Gamme étalon de sodium (Na)

Tubes	1	2	3	4	5	6
Solution mère de Na (à 100 ppm) ml	0	2	4	8	16	32
Eau bidistillée en ml	100	98	96	92	84	68
Concentration finale en ppm	0	2	4	8	16	32
Densité optique à 589 nm	0	0,06	0,11	0,21	0,36	0,58

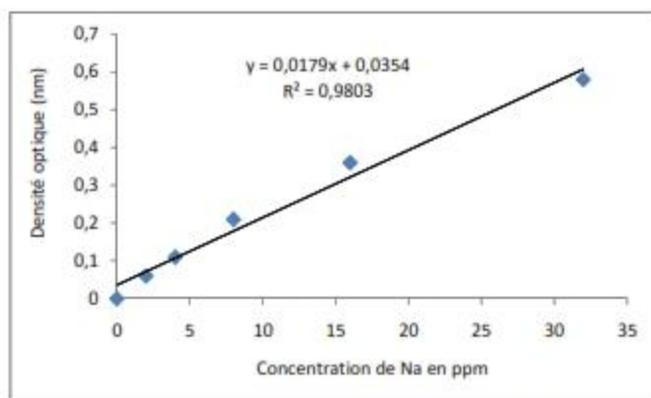


Figure 7 : Courbe d'étalonnage de sodium (Na)

Tableau 8: Gamme étalon de potassium (K)

Solution mère de K (100 ppm)	0	2	4	8	16	12
Eau bidistillée	100	98	96	92	84	68
Concentration finale en ppm	0	2	4	8	16	32
Densité optique à 768 nm	0	0,1	0,02	0,03	0,07	0,16

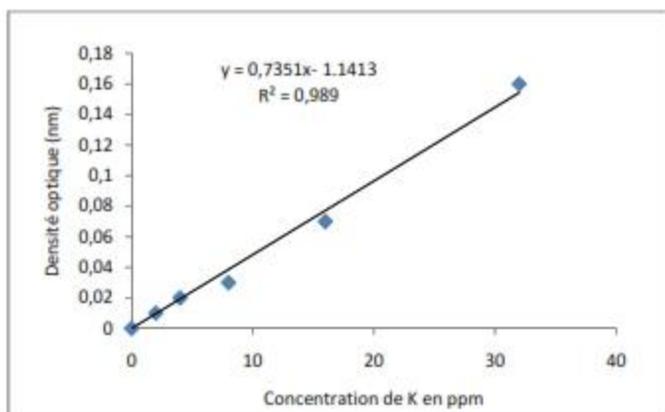


Figure 8: Courbe d'étalonnage de potassium (K)

Tableau 9: Gamme étalon de calcium (Ca)

Tubes	1	2	3	4	5	6
Solution mère de calcium à 100 ppm	0	2	4	8	16	32
Eau bi distillée en ml	100	98	96	92	84	68
Concentration en ppm	0	2	4	8	16	32
Densité optique à 623 nm	0	0.01	0.02	0.03	0.07	0.16

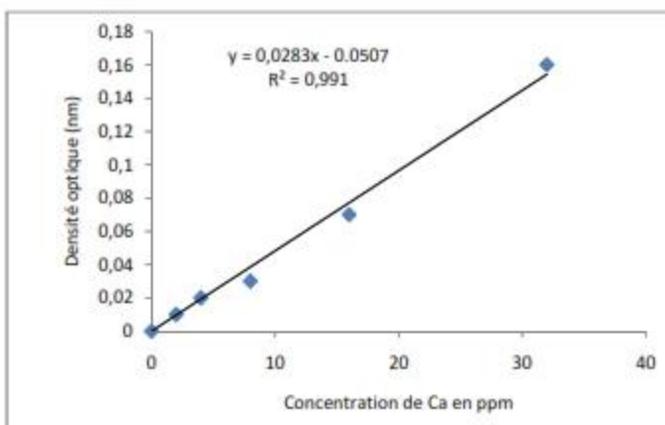
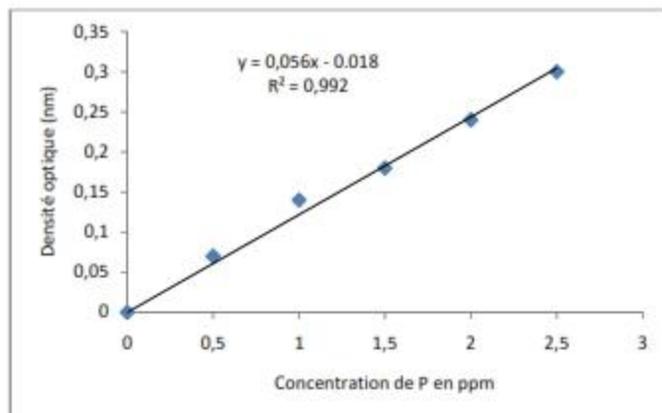


Figure 9: Courbe d'étalonnage de calcium (Ca)

Tableau 10: Gamme étalon de phosphore (P)

Tubes	1	2	3	4	5
Solution de phosphore 100 ppm	0	0,1	0,2	0,3	0,4
Solution d'acide ascorbique 0,1% en ml	6,5	6,4	6,3	6,2	6,1
Réactif sulfomolybdique (ml)	2	2	2	2	2
HCl 1,5% (1,5ml)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Concentration finale en ppm	0	0,5	1	1,5	2
Densité optique (DO) à 650 nm	0	0,07	0,14	0,18	0,24

**Figure 10:** Courbe d'étalonnage de phosphore (P)

Annexe 2



Figure 1 : Agitateur IKA T25 ULTRA TURRAX



Figure 2 : Balance RADWAG AS 220. R2



Figure 3 : Viscosimètre à bille



Figure 4 : Trancheuse électrique Perfetta DPH

Annexe 3

Estimation de la diffusivité massique et de l'énergie d'activation (Fahloul et al., 2009)

Le transfert de l'humidité pendant le séchage est contrôlé par la diffusion interne. La deuxième loi de Fick de diffusion indiquée dans l'équation (1), a été largement utilisée pour décrire le processus de séchage pour la plupart des produits biologiques

$$\frac{\delta M}{\delta t} = D \frac{\delta^2 M}{\delta z^2} \quad (1)$$

Liant la teneur en eau du produit (M), la diffusivité massique (D), le temps (t) et la direction (z). En supposant l'uniformité de la distribution de l'humidité initiale, les résistances externes négligeables et un processus isotherme, la solution de l'équation (1) proposée par Crank est:

$$\frac{\bar{M} - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-(2n+1)^2 \frac{\pi^2 Dt}{4L^2}\right] \quad (2)$$

La solution prend en compte la teneur en eau initiale (M_0), la teneur en eau à l'équilibre (M_e) et l'épaisseur de l'échantillon (L). Simplifiant l'équation (2) en prenant le premier terme de la solution de série et en supposant M_e égal à 0:

$$MR = \frac{\bar{M}}{M_0} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \exp\left[-\frac{\pi^2 Dt}{4L^2}\right] \quad (3)$$

Comme le séchage arrive seulement sur une surface de l'échantillon, l'épaisseur L dans les équations (2) et (3) est remplacée par L/2. L'équation de la couche mince utilisée par Zogzas est:

$$-\frac{dM}{dt} = K(M - M_e) \quad (4)$$

avec K, la constante de séchage. L'intégration de l'équation (4) à un instant t est:

$$MR = \exp(-Kt) \quad (5)$$

En comparant les équations (3) et (5), la constante de séchage (K) peut être rapprochée à la diffusivité massique par la relation suivante:

$$K = \frac{\pi^2 D}{L^2} \quad (6)$$

EFFECT OF DEHYDRATION BY MICROWAVE ON THE FUNCTIONAL PROPERTIES OF THE CULTIVATED APPLE IN ALGERIA

Sara **Zidani***, Ourida **Alloui Lombarkia**, Soussene **Boudraa**, Moni **Saadoudi**

Laboratory of Food Sciences(LSA), Department of Food Engineering, Institute of Agriculture and Veterinary Sciences, University Batna 1, Biskra Avenue, Batna,05000, Algeria

*Email: zidani_s@yahoo.

Abstract

Slices to 8 mm of apple variety Golden delicious yellow color cultivated in Batna, Algeria, were dried by microwave at different powers (100, 180, 300, 450, 600 and 900W). The apple drying kinetics describes regularly decreasing curves, the shortest drying time was recorded for the 900 W (600 sec). The functional properties which have been determined showed that the retention of water is important and clearly superior to that of the oil. Excellent dried apple solubility for all powers (greater than 80%) were determined for the emulsifying capacity and stability which exceeds 60%, who's the best emulsification capacity was observed for the apple dried at 180W ($69.67 \pm 3.51\%$). The foaming property is important for concentrations 16 and 20% are excellent it reaches 100%. For the color of the dried apple, the brightness L^* is inversely proportional with the increasing of power (From 100 W (44.07 ± 3.20) to 900 W (29.66 ± 4.06), the apple dried at 100 and 180W has a yellow color (respectively $b^* 24.60 \pm 1.29$ and 24.30 ± 2.38).

Keywords: Microwave drying, Apples, Golden delicious, functional properties, color, drying kinetics

Received: 17.06.2017

Received in revised form: 24.07.2017

Accepted: 22.09.2017

1. INTRODUCTION

The apple is the fruit of the common apple-tree, *Malus domestica*, of the Rosaceae family (Subfamily of the Pomoides) (Hellier *et al.*, 2000). From a botanical point of view, apple is a berry that is to say, fleshy fruit without core. Apple is now one of the most cultivated fruit in the world especially in temperate zones with a total production of 52 million tonnes in 2001 According to FAO numbers (Mehinagic, 2004).

The cultivation of apple trees in Algeria is mainly located in Medea, Batna, Tiart, Blida and Khenchela. The Algerian apple production amounted to 181 000 tons (FAO, 2009), including Golden delicious which is the most cultivated variety in Algeria and even in Batna.

Due to the seasonality of production, fruit preservation over long periods requires the implementation of specific treatments for inactivation of tissue enzymes and microorganisms and protect against further contamination (Colas, 2003).

According to Bimbenet and Bonazzi(2003), the drying process is one of the oldest methods of preserving food and agricultural products. It

can convert perishable food products stabilized by lowering the water activity (a_w) to a value less than 0.5. Most often, these products are stored at room temperature, before being used in an industrial process or in a food preparation. The functional properties occupy a very important place in the food world. The functional properties of proteins and polysaccharides are often very well characterized. The functional properties are the physical properties or physicochemical which affect their sensory behavior of these in food systems during technological, food preparation, storage and processing (Linden and Lorient, 1994)

Deferent functionality can be broken down on the basis of molecular interaction (interaction between components and between components and water) in solution or interfaces these interactions are dependent on the molecular or supra-molecular structures in cases of protein and polysaccharide macromolecules and the ionic environment (pH, ionic strength, type of ions) (Romain *et al.*, 2004).

In order to prevent quality damage due to long drying time, microwave drying has been introduced. Microwave heating is a sort of dielectric heating, which uses electromagnetic

radiation in the frequency ranging from 300 MHz to 300 GHz. According to Changrue (2006), the decrement of drying time due to volumetric heating of dielectric material increases the use of the microwave as a source of thermal energy.

Although studies have focused on the drying kinetics of *Golden delicious* couleur jaune., the lack of published work on the effect of microwave drying at levels power on functional properties including solubility, emulsifying, retention of water and oil, gelation and foaming properties of apples explains the interest for the present work.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Preparation of fruit and Calculates dry matter

The fruit of apple *Malus domestica* studied in this work is part of the *Golden delicious* variety of yellow color, it is grown in the wilaya of Batna from Algeria. The fruit was harvested in of October.

After washing the apples were cutted into slices to 8 mm (cross sectional) using a stainless steel knife.

The dry matter (DM) and humidity (H) of the apple are calculated by baking a well determined weight to $103 \pm 2^\circ \text{C}$ until a constant weight (Audigie et al., 1984). Dehydration is carried out in an oven (Model: Memmert DO 6836, Germany) and the results are calculated using the following equation.

$$H\% = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100$$

$$DM\% = 100 - H\%$$

W_1 : weight of sample before tempering(g)

W_2 : weight of sample after tempering(g)

2.2. Microwave drying kinetics

Apple drying is carried out in a microwave (Model: Samsung oven (GE107Y, SAMSUNG Electronics) with technical features characteristics of 230 V, 50 Hz with a frequency of 2,450 MHz. The dimension of the microwave cavity was 335 mm × 330 mm × 195 mm. Drying is carried out per cycle (30 sec on / 30 sec OFF) at different powers(100, 180, 300, 450, 600 and 900 respectively), the

samples were weighed after each cycle, drying is stopped when the apple water content reaches 6%. The drying curve represents the variation of the water content (X) versus time (t); this curve is obtained experimentally by following the evolution of the wet basis moisture content of the product (mh) during drying by successive equidistant weighed until the weight corresponding to the set residual moisture (6%). By the equation below it can be determined the variation of the dry base moisture content (X) versus time (Sec).

$$X = \frac{W_w - W_d}{W_d}$$

X: Moisture content on a dry basis (kg H₂O/ kg dry matter)

W_w : weight of the sample in a wet basis (g)

W_d : weight of dry matter of the sample (g)

Given the heterogeneity of the microwave heating we realized the average of ten repetitions for each power.

2.3. Functional properties analyses

2.3.1. Water and oil absorption capacity

Measurements of water and oil retention capacity are performed according to the method of Phillips et al. (1988). 1g of the dried apple is mixed (m0) in 10 ml of water or oil and the whole was mechanically stirred for 30 min using a stirrer. The mixture was then centrifuged at 4500 rpm / min for 30 min in a centrifuge (Model: SIGMA 3K20). The pellet after centrifugation is weighed (m1), but for measuring the water retention capacity, it is first dried at 105°C in an oven for 8 h (m2). The water retention capacity (CRE) and oil retention capacity (CRH) is calculated by the following formulas:

$$CRE (\%) = \frac{m2 - m1}{m1} \times 100$$

$$CRH (\%) = \frac{m1 - m0}{m0} \times 100$$

2.3.2. Solubility properties

0.1 g of the dried apples were placed into a centrifuge tube (known weight) then dissolved with 10ml of 1% acetic acid for 30min, using an incubator shaker operating at 240rpm and 25°C . The solution was then immersed in a boiling water bath for 10minutes, cooled to

room temperature (25°C) and centrifuged at 10.000rpm for 10min. The supernatant was decanted. The undissolved particles were washed in distilled water (25ml) then centrifuged at 10.000 rpm. The supernatant was removed and undissolved pellets dried at 60°C for 24hr. Finally, weighed the particles and determined the percentage solubility (Fernandez-Kim, 2004). Calculation:

$$\text{solubility (\%)} = \frac{iw - fw}{iw} \times 100$$

iw: Initial weight of sample(g)

fw: Final weight of sample (g)

2.3.3. Emulsifying properties

Emulsifying activity and stability were determined using the method of Neto, Narain, Silvia and Bora (2001). Five millilitres portion of dried apple dispersion in water (10mg·ml⁻¹) was homogenized with 5ml oil for 1min. The emulsions were centrifuged at 1100g for 5 min. The height of emulsified layer and that of the total contents in the tube was measured. The emulsifying activity was calculated as:

$$\text{Emulsifying property (\%)} = \frac{h1}{h2} \times 100$$

h1: height of emulsified layer in the tub (ml)

h2: height of the totale content in the tube (mL)

Emulsion stability was determined by heating the emulsion at 8°C for 30min before centrifuging at 1100g for 5 min. Height of emulsified layer after heating. Calculation:

$$\text{Emulsifying stability (\%)} = \frac{h1}{h2}$$

h1: height of emulsified layer heating (mL)

h2:

height of emulsified layer before heating (mL)

2.3.4. Foaming properties

The method of Coffman and Garcia (1977) is used for the determination of the foaming capacity and stability of dried apple. A weighed amount of flour is dispersed in 100 ml distilled water, after which the suspension was whipped vigorously for 2 min using a Phillips kitchen blender set at speed 2. Volumes were

recorded before and after whipping. The percentage volume increase was calculated according to the following equation:

$$\text{Volume increase (\%)} = \frac{v_2 - v_1}{v_1} \times 100$$

v₁: volume of apple solution after whipping (mL)

v₂: volume of apple solution (mL)

2.3.5. Gelation properties

Gelation properties were studied by employing the method of Coffman and Garcia (1977). Sample suspensions of 2–20% were prepared in distilled water. Ten millilitres of each of the prepared dispersions was transferred into a test tube. The test tubes were heated in a boiling water bath for 1 h, after which they were cooled in a bath of cold water. The test tubes were further cooled at 4°C for 2 hr. The least gelation concentration was taken as the concentration when the sample from inverted test tube did not fall or slip.

$$\text{Gelation properties} = \frac{h1}{h2} \times 100$$

h1 : height of gélation layer in the tube (mL)

h2 : height of the totale content in the tube (mL)

2.4. pH

1 g of the dried apple is homogenized in 3 ml of distilled water. The pH of the solution obtained was determined using a pH-meter (Model: HANNA HI 2210).

2.5. Color Measurement

The color of dried apples slices was determined using a Color reader, Minolta CR10 (Minolta Camera, Japan) referring to color space CIE L*a*b*.

2.6. Statistical analysis

The experimental data were expressed as means ± standard deviations. All determinations were carried out in five replicates. A statistical analysis of the results was performed using the 2009 XLStat software. An equal average hypothesis was tested by analysis of variance (ANOVA). The medium was significantly different when compared with the method of Newman-Keuls (p ≤ 0.05).

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Water content

The water and dry matter found for the studied apples were $84.87 \pm 0.89\%$ and $15.08 \pm 0.80\%$ respectively. These results are consistent with the values given by Aprifel (2008) with 84.3% water and 15.7% dry matter for the same variety studied. This high water content results in a high water activity and therefore the installation of biochemical and microbiological chemical alterations. This requires experts food technology field to inhibit or remove water from perishable foods by applying the proper conservation techniques that best retain these properties.

3.2. Drying Kinetics

The variation of the water content (X) versus time (Sec) for six powers of the microwave oven is shown in Figure 1.

Overall we see regularly decreasing curves (Figure 1), this is due to the high evaporation of water free of all samples.

At the beginning, the water content is important, which results in an acceleration of evaporation of water under the heating of the samples by the microwave rays.

Trade is less and less important as drying takes place because the amount of water remaining in the product is low and difficult to remove.

The drying time is reduced with increasing power and energy delivered by microwave. The power of 900 W showed the shortest time (600 Sec).

3.3. Water and oil absorption capacity

Table 1 presents the water absorption capacity and oil absorption capacity (in %) of apple dried by microwave at different powers (100, 180, 300, 450, 600 and 900 W respectively).

For the water absorption capacity, overall the results found described two phases: the first increases from 100W to 450W respectively (50 ± 2.64 , 107.33 ± 2.51 , 167 ± 2.64 and $222.33 \pm 2.51\%$) and a second decreasing phase from 450W to 900W respectively (222.33 ± 2.51 , 168 ± 3.00 and $55.3 \pm 3.32\%$). The moderate power 450W matched the best ability to absorb water.

From Table 1 it is noticed that the oil absorption capacity is inversely proportional to the water absorption capacity.

The capacity of the water and oil retention depend by the structure of protein and polysaccharide nature of macromolecules; interactions between water and the components are established at the level of acid groups and amine group present in the polysaccharide or in uncharged polar group capable of forming hydrogen bonds with water while the non-polar groups in character hydrophobic may contributed to structure the water found in their environment. According to Cloutour (1995), heat treatment such as drying by microwave is capable of modifying the content of polysaccharide and protein, and consequently the water and oil capacity respectively.

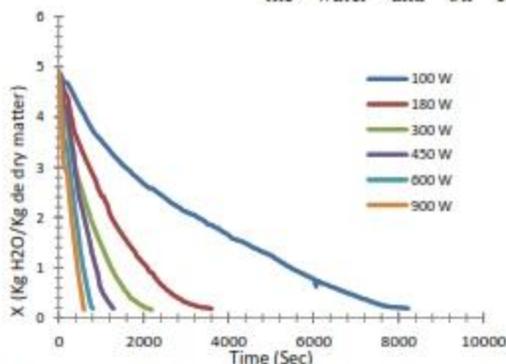


Fig. 1: Variation in moisture content X (kg H₂O / kg dry matter) versus time (sec) of dried apples in microwave oven at different power

It is noted that the capacity of the water retention is much higher than that of the oil.

This is explained by the abundance of hydrophilic groups to hydrophobic groups by

contribution, the apple is rich in polysaccharides (12.6 to 15, 3%) and low in lipid (0.3%) (Colin-Henrion, 2008).

3.4. Solubility property

From Table 2 water-solubility of apples dried by microwave at different wattages is excellent with no significant difference ($\geq 90\%$). the solubility of the macromolecules is influenced by several parameters (pH, ionic strength, drying, concentration, temperature). Generally, the components of the apple as pectin and sugars are water soluble, while proteins and lipids are readily soluble in dilute acid solutions below pH 6 (pH 4), which explains the use of acetic acid in this technique (an acetic acid solution of 1% is equivalent to pH 4).

Linden and Lorient (1994) shows that the property of solubility has major consequences on other functional properties (Emulsification, gelling). On the other hand, depending on the results obtained, the microwave drying does not have a negative effect; on the other hand it retains this property. Hence the other properties will be more or less conserved.

3.5. Emulsifying properties

Table 3 shows the emulsifying capacity and the stability of emulsions apple dried at different powers. Good capacity is observed for all samples (over 60%). Precisely the best capacity is given for the power 180W ($69.67\pm 3.51\%$), whereas for the powers 300, 100, 450W there are no significant differences respectively ($64\pm 4.58\%$, 63 ± 2.64 and $65.67\pm 0.57\%$). And finally powers 600 and 900W with emulsifying capacity respectively (60 ± 3.46 and $61.67\pm 3.51\%$) are tired last.

Firstly these results show that the applied power has an effect on this property, a moderate assay power (180W) is sufficient to have a good emulsion. On the other hand drying by microwave does not have a dramatic effect negative vis-à-vis the emulsifying capacity

The emulsifying properties are due to the reduction of inter-facial trying among the hydrophilic groups are hydrophobic groups, they are often linked to the protein solubility in water (Roudot, 2002; Chandi and Sogi, 2006).

According to Table 3 excellent emulsion stability can be seen ($> 80\%$) for all dried apples by microwave at different powers. nevertheless dried apples at 100, 180, 300 and 450 W respectively (92.33 ± 1.51 , 92.33 ± 0.57 , 93.33 ± 0.57 and $93.67\pm 0.57\%$) has a significantly higher emulsion stability contribution to dried apple at 600 and 900 W (respectively 81.67 ± 2.88 and $86.33\pm 3.51\%$).

3.6. Foaming properties

The results in Table 4 show that the foaming power is zero for all the dried apples by microwave at different powers. According to Lorient *et al.* (1988) the formation of foams is based on the presence of protein quantity and quality, thereby apple protein (0.3%) (Kaushal and Sharma, 1995) is not sufficient to form a foam.

3.7. Gelation properties

Table 5 shows the gel forming ability of the apple dried by microwave at different powers (100, 180, 300, 450, 600 and 900 W), this property is studied as a function of dried apples concentration which ranges from 2 to 20 %.

Overall, in point to all powers a proportional increase in the gelation capacity with increasing concentration, by this, that the concentration expresses the percentage of gelling agents (Proteins, polysaccharides: specifically fibers and pectin).

According Marlène and Vierling (2001), a gel is a colloid system in which the macromolecules (proteins and polysaccharides) are organized locally in networks to fixed structure surrounded by water, more or less stable because the interactions of macromolecules - water and

water -macromolecules evolve towards greater organization.

According to Table 5 for the gelation capacity of dried apples at 100, 180, 300 and 450 W and for concentrations 16 and 20% are excellent, it reaches 100%, the results are explained by the richness of apples in polysaccharide 12.6 to 15.3 while apple Macs contains 15 to 20% pectin (Lorient *et al.*, 1988) they are considered as an industrial source of pectin (Doublrier and Thibault 1984). Lorient *et al.* (1988) show that the presence of polysaccharides completely modifies the rheological properties of large quantities of water, bringing the desired changes in the texture of the food, this is conditioned by the nature of the polysaccharide and the conditions of implementation (pH, temperature....). Note that Apple studied in this work is not purchased; for apple keeps all of its compounds.

The effect of drying by microwave is confirmed by the significant differences observed in Table 5, for the powers 100, 180, 300, 450W and for concentrations 16 and 20% gel forming ability being not affected by drying microwave, while it is less important for the powers 600 and 900W respectively ($76.18 \pm 0.00\%$ and $50 \pm 0.00\%$).

3.8. pH

Table 6 present the pH of apples dried by microwave at different powers (100, 180, 300, 450, 600 and 900 W).

Generally the pH is recorded as acid at about 4, This is explained by the presence of free organic acids in the apple (0.2 to 0.6%) such as citric acid and malic acid (Kaush and Sharma, 1995).

These results are consistent with the values given by Espiard (2002) which show that the apple pH is 4 to 5

As shown in the introduction, this parameter affects the functional properties, which explains the purpose of his determination.

3.9. Color

The apple dried by microwave at 900 W appear darker compared to apple dried using other powers (100, 180, 300, 450 and 600 W). This visual observation was confirmed by the results of instrumental measurement of color (Table 7, Figure 2). Namely, apple dried at 900 W obtained the lowest value of parameter L^* amounting to 29.66 ± 4.06 . The change of color could be because of enzymatic browning and caramelization effect or due to the protein and sugar denaturation (Krokida *et al.*, 1999) occurring to microwave heating, which gives rise to high temperature within the dried material. On the other hand, the brightest samples were obtained at 100($L^*44.07 \pm 3.20$) and 180 W ($L^*45.08 \pm 1.29$) powers, which indicate that low power drying provides brighter color dried product. Apple has high amount of reducing sugars. It contains 5.36 g fructose, 1.61 g glucose, 1.39 g sucrose, and 2.04 g sorbital per 100 g of fresh weight (Fourie *et al.*, 1991) and 11 to 17 mg of vitamin C per 100 g of fresh weight (Samotus, 1988). With these amounts of reducing sugars, Maillard reaction and oxidation of ascorbic acids took place when the apples had been exposed to high powers (600 et 900 W).

According to Table 7 apple dried at powers by 100, 180 and 300W respectively retains the yellow color of apple ($b^*20.22 \pm 3.20$ 24.60 ± 1.29 and 24.30 ± 2.38 respectively). The power of 450, 600 and 900 W could produce dehydrated apple with attractive appearance such as golden yellow ($b^*28.86 \pm 0.7$) and golden light brown colors which were confirmed by relatively high b^* values amounting to 34.32 ± 3.33 and 37.48 ± 4.06 , respectively.

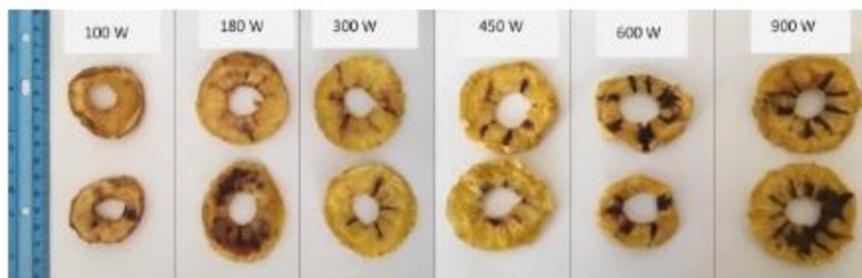


Fig. 2 : Dried apple slices in microwave at different power

Table 1. Water and oil absorption capacity (%) of dried apple in microwave at different power

Power (W)	Water absorption capacity (%)	Oil absorption capacity (%)
100	50±2.64 ^a	23.67±1.52 ^a
180	107.33±2.51 ^c	33.33±4.16 ^b
300	167±2.64 ^b	29.33±3.05 ^c
450	222.33±2.51 ^a	35.33±4.05 ^b
600	168±3.00 ^b	36.33±4.16 ^b
900	55.33±3.05 ^d	49.33±4.72 ^a

The means followed by a different letter are significantly different at the threshold of $p < 5\%$

Table 2. Solubility capacity (%) of dried apple in microwave at different power

Power (W)	Solubility capacity (%)
100	90±0.00 ^a
180	91.50±0.61 ^a
300	91.67±0.58 ^a
450	93.83±0.06 ^a
600	93.33±0.58 ^a
900	91.67±0.58 ^a

The means followed by a different letter are significantly different at the threshold of $p < 5\%$

Table 3. Emulsifying activity and stability (%) of dried apple in microwave at different power

Power (W)	Emulsifying activity (%)	Emulsifying stability (%)
100	64±4.58 ^{ab}	92.33±1.51 ^a
180	69.67±3.51 ^a	92.33±0.57 ^a
300	63±2.64 ^{ab}	93.33±0.57 ^a
450	65.67±0.57 ^{ab}	93.67±0.57 ^a
600	60±3.46 ^b	81.67±2.88 ^c
900	61.67±3.51 ^b	86.33±3.51 ^b

The means followed by a different letter are significantly different at the threshold of $p < 5\%$

Table 4. Foaming capacity (%) of dried apple in microwave at different power

Power (W)	Foaming capacity (%)
100	00
180	00
300	00
450	00
600	00
900	00

Table 5. Gelation properties (%) of dried apple in microwave at different power

Power (W)	Gelation Capacity Concentrations (%)					
	2	4	8	12	16	20
900	20±1 ^{bc}	23.63±0.01 ^f	40±1 ^d	46.36±0.00 ^e	46.54±0.00 ^d	50±0.00 ^d
600	16.36±0.01 ^e	55.45±0.01 ^d	43.63±0.00 ^d	74.54±0.00 ^e	75.18±0.00 ^e	76.18±0.00 ^e
450	12.72±0.01 ^e	27.27±0.01 ^f	31.81±0.00 ^e	59.09±0.00 ^{cd}	100±0.00 ^a	100±0.00 ^a
300	14.54±0.01 ^e	14.54±0.01 ^e	50±1 ^d	100±0.00 ^a	100±0.00 ^a	100±0.00 ^a
180	13.63±0.01 ^e	21.18±0.00 ^e	25.45±0.00 ^f	97.27±0.01 ^b	100±0.00 ^a	100±0.00 ^a
100	15.45±0.01 ^e	36.36±0.00 ^e	76.36±0.00 ^e	54.54±0.00 ^d	100±0.00 ^a	100±0.00 ^a

The means followed by a different letter are significantly different at the threshold of $p < 5\%$

Table 6. pH of dried apple in microwave at different power

Power (W)	pH
100	3.94±0.01 ^a
180	3.87±0.01 ^b
300	3.84±0.02 ^{bc}
450	3.94±0.01 ^a
600	3.92±0.02 ^a
900	3.92±0.01 ^a

The means followed by a different letter are significantly different at the threshold of $p < 5\%$

Table 7. Color of dried apple in microwave at different power

Power (W)	L^*	a^*	b^*
600	48.180 ^a	20.220 ^a	37.600 ^a
180	47.880 ^a	19.800 ^a	36.560 ^a
900	47.080 ^a	19.280 ^a	36.300 ^a
450	44.075 ^a	18.080 ^a	34.225 ^{ab}
300	35.600 ^b	17.500 ^a	32.320 ^b
100	29.660 ^c	17.000 ^a	30.280 ^c

The means followed by a different letter are significantly different at the threshold of $p < 5\%$

4. CONCLUSION

The microwave dehydration of the *Golden Delicious* apple cultivated in Algeria appear encouraging results on the conservation and improvement of the functional properties of this fruit, namely water retention, solubility, gelation and emulsifying. Except for the ability of the oil retention that relatively small and lack of foaming ability; the studied apple is unable to form foam.

These results show the important role of this fruit in the food industry, such as the manufacture of beverages on the basis of solubility and its ability to retain water, the manufacture of jellies and creams for its ability its related to emulsifying and gelling, and any other applications especially in confectionery and pastry.

Statistical analysis shows that moderate powers by 180, 300 and 450W delivered the best functional properties and same for color, then it is not worthwhile to apply the higher powers.

Dried by microwave of apple retains relatively its original color (yellow), all take into account the microwave drying heterogeneity induces heterogeneity on color.

Moreover, the kinetics of the dehydration of apple shows that microwave drying time is short in supply to other drying methods. This reveals economic importance of dehydration by microwave of the apples.

5. REFERENCES

- [1] Adebowale, K.O. & Lawal, O.S. (2004). Comparative study of the functional properties of bambarra groundnut (*Voandzeia*

- subterranean), jack bean (*Canavalia ensiformis*) and mucuna bean (*Mucuna pruriens*) flours. *Food Research International*, **37**:355-365.
- [2] Alhaddad, M. (2007). Contribution théorique et modélisation des phénomènes instantanés dans les opérations des auto-vaporisations et de déshydratation. Doctorat thesis. Rochelle University. France, 221p.
- [3] Alias, C. & Linden, G. (1997). *Biochimie alimentaire*. (4th ED) Masson. Paris, 255p.
- [4] Audigie, C.L., Figarella, J. & Zonszain, F. (1984). Manipulation D'analyse Biochimique. Doin, Paris, pp : 25-37.
- [5] Beuchat, L. R. (1977). Functional and electrophoretic characteristics of succinylated peanut flour protein. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **25**:258-261.
- [6] Bimbenet, J.J. & Bonazzi, C., 2003. Séchage des produits alimentaires. Principes. *Revue de Technique de l'Ingénieur. Agroalimentaire*, F3000: 1-14pp.
- [7] Chandí, G.K. & Sogi, D.S. (2006). Functional properties of rice bran protein concentrate. *Journal of food Engineering*, **79**:592-597.
- [8] Changrue, V. (2006). Hybrid (osmotic, microwave-vacuum) drying of strawberries and carrots. Thesis of Doctor of Philosophy, Montreal. Quebec, Canada, 170p.
- [9] Charreau, A. & Cavaillé R. (1995). Séchage-théorie et calcul. *Revue de Technique de l'Ingénieur. Génie de procédés*, J2480 :1-22p
- [10] Chong, C.H., Figiel, A., Chung, L.L. & Wojdylo, A. (2014). Combined Drying of Apple Cubes by Using of Heat Pump, Vacuum-Microwave, and Intermittent Techniques. *Journal of Food Bioprocess Technology*, **7**:975-989
- [11] Coffman, C. W. & Garcia, V. V. (1977). Functional properties and amino acid content of protein isolate from mung bean flour. *Journal of Food Technology*, **12**:473-484.
- [12] Colas, B. (2003). Propriétés structurantes de l'eau dans les légumes et dans les fruits. In : Meste, M., Lorient, D., Simatos, D. (ED) Tec and Doc-Lavoisier. Paris, 674p.
- [13] Colin-Henriou, M. (2008). De la pomme à la pomme transformée : Impact du procédé sur deux composés D'intérêt nutritionnel Caractérisation physique et sensorielle des Produits transformés. Doctoral thesis in agronomic sciences. Doctoral School of Angers France, 274p.
- [14] Doublier, J.L. & Thibault, J.F. (1984) Additifs et auxiliaires de fabrication dans les industries agro-alimentaires. In : J.L. Multon. (ED) Tec and Doc-Lavoisier. Paris, pp 305-341.
- [15] Espiard E., 2002. Introduction à la transformation industrielle des fruits. (2nd ED). Tec and Doc-Lavoisier. Paris, 360p.
- [16] FAO. 2009. Agro-statistics Database. (ED) Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. Website: [hTTP://Fao.org/](http://Fao.org/) on 16 october 2016.
- [17] Fernandez-Kim, S-O. (2004). Physicochemical and functional properties of crawfish chitosan as affected by different processing protocols. Master Thesis of Science. Louisiana State University, 99p.
- [18] Fourie, P. C., Hansmann, C. F., & Oberholzer, H. M. (1991). Sugar content of fresh apples and pears in South Africa. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **39**:1938-1939.
- [19] Hellier, R., Esnault, R. & Lance C. (2000). Formation des fruits et des graines. Dans *Physiologie végétale. 2-Développement*. (ED) Dunod, pp 220-239.
- [20] Kaushal, B. B. & Sharma, P.C. (1995). Apple. In: Salunkhe D. K. (EDs) Handbook Fruit Science and Technology. INC, New York Basel, pp 91-122.
- [21] Krokida, M. K., & Maroulis, Z. B. (1999). Effect of microwave drying on some quality properties of dehydrated products. *Journal of Drying Technology*, **17** (3):449-466.
- [22] Linden, L. & Lorient, D. (1994). Biochimie agro-industrielle-Valorisation alimentaire de la production agricole. (ED) Masson. Paris. Milan, Barcelone, 359p.
- [23] Lorient, D., Colas, B., Le meste, M. (1988). Propriétés fonctionnelles des macromolécules alimentaires. The notebooks of the ENS.BANA.N° 6. (ED) Tec and doc-Lavoisier. Paris, 268p.
- [24] Mehinagic, E. (2004). Recherche de descripteurs objectifs de la qualité sensorielle des pommes (*Malus domestica*). Doctorat thesis. Nantes University. Sciences and technologies Faculty, France, 301 p.
- [25] Mérlène, F. & Vierling, E. (2001). Biochimie des aliments diététiques des sujets bien portant. (2nd ED) Netherlands, 285p.
- [26] Neto, V. Q., Narain, N., Silvia, J. B. & Bora, P. S. (2001). Functional properties of raw and heat-processed cashew nut (*Anacardium occidentale* L.) kernel protein isolate. *Nahrung*, **45** : 258-262.
- [27] Phillips, R. D., Chinnan, M. S., Branch, A. L., Miller, J. & Mc Watters K. H. (1988). Effects of pre-treatment on functional and nutritional properties of cowpea meal. *Journal of Food Science*, **53**(3): 805-809.
- [28] Redout, A.C. (2002). Rhéologie et analyse de texture des aliments. (ED) Tec and Doc. Paris, 199p.
- [29] Romain, J., Thomas, C., Pierre, S. & Gererd, B. (2004). Sciences des aliments. Vol. 2. (ED) Lavoisier. Paris, 453p.
- [30] Samotus, B. (1988). Saccharides. In: *Chemia żywności* Z.E. Sikorski, B. Drozdowski, B. Samotus, M. Palasiński. (ED) PWN, Warszaw, pp 37-128.