

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université AKLI MOHAND OULHADJ-BOUIRA



Faculté des sciences de la nature et de la vie et des sciences de la terre SNVST
Département de sciences biologiques
Laboratoire ou unité de recherche de rattachement GVRNAQ

THÈSE
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
DOCTORAT

Domaine : Biologie Filière : Sciences biologiques
Spécialité : Biochimie Appliquée

Présentée par
ADEL-ABDERRAHIM Khadidja

Thème

Effet de la technique du séchage sur la qualité de l'orange séchée

Soutenue le : 02 /05 /2023

Devant le Jury composé de :

Nom et Prénom

Grade

Mr HAIHEM Ammar

Professeur

Univ. de Bouira

Président

Mr DAHMOUNE Farid

Professeur

Univ. de Bouira

Rapporteur

Mr REMINI Hocine

MCB

Univ. de Bouira

Co-rapporteur

Mr KADRI Nabil

Professeur

Univ. de Bouira

Examineur

Mr MADANI Khodir

Professeur

Univ. de Bejaia

Examineur

Mr LEFSIH Khalef

MCA

Univ. de Tizi Ouzou

Examineur

Année Universitaire : 2022/2023

Productions scientifiques

Publications

Abderrahim, K. A., Remini, H., Dahmoune, F., Mouhoubi, K., Berkani, F., Abbou, A., ... & Madani, K. (2022). Influence of convective and microwave drying on Algerian blood orange slices: Drying kinetics and characteristics, modeling, and drying energetics. *Journal of Food Process Engineering*, 45(12), e14176.

Abbou, A., Kadri, N., Dahmoune, F., Chergui, A., Remini, H., Berkani, F., **Adel, K.**, Boukhalfa, F., Madani, K. (2020). Optimising functional properties and chemical composition of Pinus halepensis Mill. Seeds protein concentrates. *Food Hydrocolloids*, 100, 105416.

Abbou, A., Kadri, N., Debbache, N., Dairi, S., Remini, H., Dahmoune, F., Berkani, F., **Adel, K.**, Belbahi, A., Madani, K. (2019). Effect of precipitation solvent on some biological activities of polysaccharides from Pinus halepensis Mill. seeds. *International journal of biological macromolecules*, 141, 663-670.

Farida Berkani, Farid Dahmoune, Sabiha Achat, Sofiane Dairi, Nabil Kadri, Sabrina Zeghichi-Hamri, Amina Abbou, Imane Benzitoune, **Khadidja Adel**, Hocine Remini, Amine Belbahi & Khodir Madani. Response surface methodology optimization of microwave-assisted polysaccharide extraction from Algerian jujube (*Zizyphus lotus* L.) pulp and peel. *Journal of Pharmaceutical Innovation*, 16, 630-642.

Berkani, F., Maria Luísa Serralheiro, Farid Dahmoune, Malik Mahdjoub, Nabil Kadri, Sofiane Dairi, Sabiha Achat, Hocine Remini, Amina Abbou, **Khadidja Adel**, Khodir Madani. (2021). *Zizyphus lotus* (L.) Lam. plant treatment by ultrasounds and microwaves to improve antioxidants yield and quality: An overview. *The North African Journal of Food and Nutrition Research*, 5(12), 53-68.

Ourdia-Nouara Kernou, Amine Belbahi, Ghania, Kaanin-Boudraa, **Khadidja Adel**, Pr. Khodir Madani. A Review: Ultrasound-Microwave Technologies as Alternative Methods for Inactivation Bacterias in Fruit Juice. *International Journal of Analytical and Applied Chemistry*. 2022; 8(2): 31–40p.

Communications

15-16 Décembre 2018 : Séminaire international les produits du terroir un outil du développement de l'agriculture de montagne Chemini -Bejaïa – Algérie « Comparaison entre deux techniques de séchage : microonde et étuve sur la qualité des écorces d'orange sanguine ».

18-19 Février 2019 : Séminaire international environnement et toxicologie « sinentox2019 » « cinétique de destruction des microorganismes par microonde, cas d'étude : boues résiduelles de la station d'épuration de la ville de Bouira »

25-26 Septembre 2019 : Séminaire national sur la gestion intégrée des déchets ménagers et industriels (SNGIDMI) Ait Toudert -Tizi-Ouzou « valorisation des agrumes et de leurs sous-produits de l'industrie de transformation par extractions des composés phénoliques »

25-26 Septembre 2019 : Séminaire national sur l'alimentation, santé et environnement : avancées et perspectives – Bejaïa, « study of the résistance of *Staphylococcus aureus* résistant to the methicillin to other antibiotics »

16 Décembre 2019 : Premières journée doctorale des sciences de la nature et de la vie- Bejaïa « évaluation de l'activité antioxydante de *Citrus sinensis (l.) osbeck* à différents procédés de séchage »

04 - 05 Mars 2020 : Premières journées doctorales de la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre – Bouira. « Participation à l'atelier de la Présentation des thématiques de recherche des doctorants »

15-16 octobre 2021 : Journées nationales de l'agro- Eco-Biotechnologie (JNAEB 2021) - Université de Blida 1 « Activité Biologique de l'extrait phénolique des tranches complètes de *Citrus sinensis* séché par étuve ».

Formations

09-10 décembre 2018 : Journées d'accompagnement des doctorants.

11-12 Novembre 2019 : journées de formation sur les droits de la propriété industrielle (INAPI)

26 février 2020 : Outils de recherche scientifique, université de Bouira.

Remerciements

Je remercie mon DIEU le tout puissant pour toute la volonté, la force et le courage qu'il m'a donné pour l'achèvement de ces travaux.

Je tiens en premier temps à remercier énormément mon directeur de thèse professeur DAHMOUNE Farid de l'université de Bouira. J'apprécie votre considération, vos orientations votre aide et le temps que vous m'avez consacré durant toutes ces années de thèse.

Mes sincères appréciations à mon co-directeur de thèse docteur REMINI Hocine de l'université de Bouira, veuillez agréer mes remerciements pour tous vos précieux conseils, votre disponibilité et votre soutien tout au long de ce travail.

Je tiens aussi à remercier chaleureusement professeur HAIHEM Ammar de l'université de Bouira d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse, mes remerciements et mon appréciation.

Au professeur KADRI Nabil de l'université de Bouira, je suis reconnaissante, votre aide et votre implication dans ce projet sont grandement appréciés, merci aussi d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Je remercie vivement professeur MADANI Khodir de l'université de Bejaïa qui m'a fait l'honneur de juger ces travaux de recherche, qu'il soit assuré de ma gratitude et de mon profond respect.

Je tiens à remercier docteur LEFSIH Khalef de l'université de Tizi Ouzou qui a accepté d'examiner ce travail et celui qui m'a honoré par sa présence.

J'exprime aussi toute ma gratitude au professeur MOUNI Lotfi le directeur du laboratoire LGVRNAQ de l'université de Bouira. Ma profonde pensée à mes amis de ce laboratoire, j'ai apprécié l'opportunité de travailler avec vous et les moments partagés ensemble.

Je remercie sincèrement professeur MADANI Khodir et BOULEKBACHE Lila, les directeurs du laboratoire BBBS de l'université de Bejaïa, les ingénieurs, de m'avoir facilité l'accès au laboratoire dont j'ai effectué tous mes travaux de recherche, et à mes amis de ce laboratoire, j'apprécie votre aide et j'espère que nous continuerons à travailler en équipe.

Mes remerciements s'adressent aux chefs des départements et tout le staff administratif de la faculté SNV-ST et de l'université de Bouira.

Je tiens également à adresser mes vifs remerciements aux membres de la ferme de Oued Ghir, dont j'ai effectué mon échantillonnage de l'orange sanguine.

Dédicaces

À mes très chers parents

À toi, mon tendre époux

À la prunelle de mes yeux, Hiba

À mes adorables frangines

Et à tous ceux qui me sont chers ...

Khadija

TABLE DES MATIERES

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction 1

Synthèse bibliographique

PARTIE A : Généralités sur les agrumes et l'orange sanguine

I Les agrumes	3
I.1 Définition	3
I.2 Origine géographique et distribution.....	3
I.3 Description botanique	6
I.4 Utilisations	7
II L'orange sanguine	8
II.1 Définition	8
II.2 Origine	8
II.3 Classification botanique.....	9
II.4 Production mondiale	9
II.5 Production méditerranéenne et algérienne.....	10
II.6 composition chimique.....	11
II.7 Principales variétés	12
II.7.1 Les oranges amères <i>Citrus aurantium L.</i>	12
II.7.2 Les oranges douces <i>Citrus sinensis [L.] Osbeck</i>	12
II.8 Exigences climatiques.....	14
II.8.1 Climat.....	14
II.8.2 Sol.....	15
II.9 Les antioxydants des oranges sanguines.....	15

II.9.1 Définition	15
II.10 Intérêt technologique et transformation	17

Partie B : Séchage et modélisation

I. Séchage	18
I.1 Définition	18
I.2 Avantages et inconvénients du séchage	19
I.2.1 Avantages	19
I.2.2 Inconvénients	19
I.3 Les voies de séchage	19
I.3.1 Voie mécanique	19
I.3.2 Voie chimique.....	19
I.5.3 Voie thermique	20
I.4 Modes de séchage.....	20
I.4.1 Séchage par entraînement	20
I.4.2 Séchage par ébullition	20
I.5 Modes de transfert de chaleur et de matière.....	21
I.5.1. Transfert interne de matière.....	21
I.5.2. Le transfert interne de chaleur	22
I.6 Choix du procédé de séchage	23
I.7 Phénomènes se produisant au cours du séchage	23
I.7.1 Les réactions biochimiques	23
I.7.2 Les transferts physiques.....	24
I.7.3 Les phénomènes mécaniques.....	24
I.8. Méthodes de séchage.....	24
I.8.1 Séchage conventionnel	24
I.8.2 Séchage par micro-ondes	25

I.9. Notions de base	30
I.9.1 Activité de l'eau.....	30
I.9.2 Teneur en humidité	31
I.9.3 Rapport d'humidité	32
I.9.4 Taux de séchage.....	32
I.10 Procédé de séchage en couche mince	33
II Cinétique de séchage	34
II.1 Définition	34
II.2 Représentations graphiques des cinétiques de séchage	34
II.2.1 Variation de la teneur en eau en fonction du temps	34
II.2.2 Variation de la vitesse de séchage en fonction du temps	35
II.2.3 Variation du taux de séchage en fonction de la teneur en eau	36
II.3 Facteurs affectants la cinétique du séchage	36
II.3.1 Température de l'air.....	37
II.3.2 Vitesse de l'air.....	37
II.3.3 Humidité de l'air	37
III. Modélisation mathématique	38
III.1 Définition	38
III.2 Intérêt de la modélisation	38
III.3 Classification des modèles mathématiques	39
III.3.1 Modèles théoriques	39
III.3.2 Modèles semi-théoriques	39
III.3.3 Modèles empiriques	39
III.4 Statistiques sur la qualité de l'ajustement des modèles	40
III.4 Notion de constante de séchage, de diffusivité effective de l'humidité et d'énergie d'activation.....	41

III.4.1 Constante de séchage	41
III.4.2 Diffusion effective de l'humidité.....	42
III.4.3 Énergie d'activation	43

Partie Expérimentale

Partie A : Cinétique de séchage et modélisation

Matériel et Méthodes

I. Matériel végétal.....	45
Description de la variété	45
Collecte	45
II. Méthodes.....	46
II. 1 Equipements et procédure de séchage	46
II.1.1 Séchage par convection	46
II.1.2 Séchage par micro-ondes.....	46
II.2 Taux d'humidité et matière sèche	47
II.3 Représentations de la cinétique de séchage.....	47
II.3.1 Evolution du taux d'humidité en fonction du temps	47
II.3.2 Evolution de la vitesse de séchage en fonction du temps	48
II.3.3 Evolution de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau.....	48
II.4 Détermination de la teneur en eau et des activités de l'eau	48
II.4.1 Teneur en eau	48
II.4.2 Activité de l'eau (a_w)	49
II.5 Analyse statistique	49
III. Modélisation mathématique des courbes de séchage.....	49
IV. Diffusion effective de l'humidité	51
V. Énergie d'activation	52

VI. Relation entre la constante de vitesse de séchage et la diffusivité effective de l'humidité	53
VII. Consommation d'énergie	53
VIII. Analyse statistique.....	54

Résultats et discussion

I Séchage	55
I.1 Humidité de l'orange sanguine fraîche	55
II. Cinétique de séchage à l'étuve ventilée de l'orange Moro	56
II.1. Variation de la perte en masse en fonction du temps de séchage	56
II.2. Variation du rapport d'humidité en fonction du temps de séchage	57
II.3. Variation de la vitesse de séchage en fonction du temps de séchage	59
II.4. Variation de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau	60
III. Modèles mathématiques empiriques en couche mince.....	62
IV. Diffusion effective de l'humidité	64
V. Énergie d'activation (E_a).....	65
VI. Consommation d'énergie.....	66
Conclusion partielle.....	69

Partie B : Evaluation de la qualité et activités biologiques

Matériel et méthodes

I. Matériel végétal.....	70
I.1. Taux d'humidité et matière sèche	70
I.2. Séchage.....	70
I.3. Broyage et tamisage	70
II. Effet du séchage sur la composition de <i>Citrus sinensis</i> [L.] Osbeck	71

II.1 Matière sèche	71
II.2 Matière minérale et matière organique	71
II.3 Acide ascorbique.....	71
II.4 caroténoïdes	72
II.5 Fonctions et liaisons chimiques	72
II.6 Composés phénoliques.....	72
II.6.1 Protocole d'extraction	72
II.6.2 Couleur des extraits polyphénoliques	73
II.6.3. Indice des polyphénols	73
II.6.4 Polyphénols totaux	73
II.6.5. Flavonoïdes	74
II.6.6. Anthocyanes	74
II.6.7 Tannins condensés totaux.....	74
III. Evaluation des activités biologiques	75
III.1. Activité antioxydante.....	75
III.1.1. Test à l'ABTS ^{·+}	75
III.1.2. Test DPPH ^{·+}	75
III.1.3. Pouvoir réducteur (FRAP)	76
III.2 Test de cytotoxicité.....	76
IV. Analyse statistique	76

Résultats et discussion

I. Effet du séchage sur la composition de l'orange sanguine.....	78
I.1 Matière sèche et activité de l'eau	78
I.2 Matière minérale et matière organique.....	79
I.3 Acide ascorbique	80
I.4 Caroténoïdes.....	82

I.5 Fonction et liaisons chimiques	84
I.6. Composés phénoliques	86
I.6.1 Rendement d'extraction.....	86
I.6.2 Couleur des extraits polyphénoliques.....	87
I.6.3 Indice des polyphénols	88
I.6.4 Polyphénols totaux	89
I.6.5 Flavonoïdes.....	92
I.6.6 Anthocyanes	93
II. Evaluation des activités biologiques.....	97
II.1 L'activité antioxydante des extraits phénoliques.....	97
II.1.1 Activité antioxydant par le test ABTS ^{•+}	97
II.1.2. Activité antioxydant des extraits au radical DPPH ^{•+}	99
II.1.3. Le pouvoir réducteur ferrique des extraits (FRAP).....	102
II.2 Test de cytotoxicité	104
Conclusion partielle.....	107
Conclusion générale	109
Références bibliographiques	

Liste des abréviations

- A : Constante de stabilisation ($\text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}$)
- $a, b, c, L1, L2$ - Coefficients des équations
- A_1 et A_2 : constantes géométriques
- ANOVA : Analyse de la variance
- CD : Séchage par convection
- D : Profondeur
- D_0 et D_0' : Facteur pré-exponentiel (m^2 / s)
- D_{eff} : Diffusion effective de l'humidité ou Diffusion effective (m^2 / s)
- $(D_{eff})_{th}$: Diffusivité effective théorique (m^2 / s)
- dm : Matière sèche
- DR : Vitesse de séchage
- dt : Différence de temps
- E : Consommation totale d'énergie électrique (kWh)
- E_a : Energie d'activation
- EE : Efficacité énergétique (%)
- F_0 : Nombre de Fourier
- GHz : Giga Hertz
- H : Hauteur
- Hz : Hertz
- K : Kelvin
- k, k_1, k_2 : Constantes de séchage (1/min)
- k_0 et k_0' : Constante pré-exponentielle (1/min)
- k_{th} : Constante de vitesse de séchage théorique (1/min)
- L : Moitié de l'épaisseur (m)
- ln : Logarithme népérien
- m : Masse de l'échantillon brut (g)
- MC_{db} : Teneur en eau en base sèche
- MC_{wb} : Taux d'humidité en base humide
- M_e : Teneur en eau à l'équilibre
- $\text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}$: Seconde par minute par mètre carré

M_0 : Teneur en humidité initiale

MR : Taux d'humidité

$MR_{exp,i}$: Taux d'humidité expérimental

$MR_{pre,i}$: Taux d'humidité prévisionnel

M_s : Masse de matière solide sèche (en Kg)

M_t : Taux d'humidité à un moment précis

$M_{(t+dt)}$: Taux d'humidité à t+dt

N : Nombre d'observations

n : Exposant

P : Puissance des micro-ondes (W)

r : Coefficient de corrélation

R : Constante universelle des gaz (8,314 kJ/mol K) R^2 : coefficient de détermination

$RMSE$: Erreur quadratique moyenne

$SECe$: Consommation spécifique d'énergie électrique (MJ/Kg d'eau)

W : Largeur

w_a : Activité de l'eau

W_1 : Poids de l'échantillon avant séchage (g)

W_2 : Poids de l'échantillon séché à l'os (g)

χ^2 : Chi-carré

X_i : Teneur en humidité initiale (dm)

X_f : Humidité finale (dm)

z : Nombre de paramètres constants dans l'équation du modèle.

Δh_v : Enthalpie d'évaporation de l'eau (2257 KJ/Kg, à 100°C).

Abs : Absorbance.

ABTS : Acide 2,2,-azinobis-3-éthylbenzothiasoline-6-silfonique.

AW : Activité de l'eau.

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

DCPIP : 2,6-dichlophénole-indophénole

Eq AG : Equivalent milligramme d'acide gallique

EqQ : Equivalent milligramme de quercétine

EqCya-3-Glu : Milligramme équivalent de cyanidine-3-glucoside

ES : Extrait sec

Eq AA : Equivalent gramme de L-Acide Ascorbique

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.

FD : Facteur de dilution

FT-IR : spectrophotomètre infrarouge à transformée de Fourier

IC : Indice de couleur

IPP : Indice de polyphénol

min : Minute.

ml : Millilitre

MM : Matière minérale

mM : Milli mole.

MS : Matière sèche

MO : Matière organique

PPT : Polyphénols totaux

PM : Poids moléculaire

Rpm : Rotation par min.

TCA : Acide trichloracétique

TH : Taux d'humidité

W : Watt

°C : Degré Celsius.

μl : Microlitre.

μm : Micromètre.

% : Pourcentage.

Liste des figures

Figure 1. Branche, fleurs et fruits d'oranger doux (Köhler, 1887)	6
Figure 2. Coupe équatoriale d'une orange (Goudeau et al., 2008).	7
Figure 3. Origine et formes des agrumes (Nicolas, 2014).....	9
Figure 4. Production mondiale d'orange entre 1994 et 2018.....	10
Figure 5. Les parts de la production d'orange dans le monde (FAO, 2021).	10
Figure 6. Photographie d'une coupe longitudinale d'une orange sanguine	13
Figure 7 . Phénotypes des variétés et des hybrides d'oranges (Lo Piero, 2015).....	14
Figure 8. Schéma d'un four à micro-ondes monomode et multi mode(Perino & Chemat, 2015).....	27
Figure 9. Distribution des dipôles sous l'effet dans un champ électrique.....	28
Figure 10. Transferts thermiques sous les deux modes de chauffage (Ferhat, 2007)	29
Figure 11. Diagramme de l'activité de l'eau et de la stabilité des aliments (Bonazzi & Dumoulin, 2011).....	31
Figure 12. Graphiques typiques de la cinétique du séchage : (A) courbe de séchage ; (B) courbe de vitesse de séchage (H. T. Sabarez, 2016).	35
Figure 13. Représentation graphique de la variation du taux de séchage en fonction de la teneur en eau (Azam-Ali, 2007).	36
Figure 14. Photographie de l'orangé et du fruit (orange sanguine Moro).....	45
Figure 15. Images de l'étuve ventilée (a) et du microonde (b) utilisés lors des expériences de séchage.	47
Figure 16. La perte de masse en fonction du temps de séchage à différentes températures (a) à différents niveaux de puissance (b).	56
Figure 17. Variation du rapport d'humidité expérimental en fonction du temps de séchage à différentes températures (a) et du séchage par micro-ondes à différents niveaux de puissance (b).	58
Figure 18. Variation de la vitesse de séchage en fonction du temps de séchage à différentes températures (a) et à différents niveaux de puissance (b).	59
Figure 19. Variation de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau à différentes températures (a) et à différents niveaux de puissance (b).	61
Figure 20. Variations de la consommation spécifique d'énergie électrique (SEC_e) et d'énergie électrique (EE) : (a) séchage convectif et (b) séchage aux micro-ondes.....	67

Figure 21. Photographie du broyeur électrique (a), poudre de l'orange Moro (b), tamiseur automatique (c).....	70
Figure 22. Photographie des tranches d'orange sanguine après séchage	71
Figure 23. Taux d'humidité et de matière sèche des poudres d'orange sanguine.....	78
Figure 24. Taux de matière minérale et de matière organique des poudres d'orange sanguine.	80
Figure 25. Teneur des poudres d'orange sanguine en acide ascorbique.	81
Figure 26. Teneur des poudres d'orange sanguine en caroténoïdes	82
Figure 27 Spectre FT-IR des poudres d'oranges	84
Figure 28. Rendement d'extraction des composés phénoliques.....	86
Figure 29. L'indice de polyphénols des extraits d'orange sanguine	88
Figure 30. Teneurs des extraits d'orange sanguine séchés en polyphénols.	90
Figure 31. Teneurs des extraits d'orange sanguine séchés en flavonoïdes.	92
Figure 32. Teneur d'orange sanguine en anthocyanes.	94
Figure 33. Teneur d'orange sanguine en tannins condensés.	96
Figure 34. Pourcentage d'inhibition du radical ABTS ^{·+} par les extraits de l'orange sanguine.	98
Figure 35 . IC ₅₀ du radical ABTS ^{·+} des extraits de l'orange sanguine.	99
Figure 36. Pourcentage d'inhibition du radical DPPH ^{·+} par l'extraits d'orange sanguine. ...	100
Figure 37. IC ₅₀ du radical DPPH ^{·+} des extraits de l'orange sanguine.....	101
Figure 38. Pouvoir réducteur ferrique des extraits de l'orange sanguine.	103
Figure 39. Pourcentage d'hémolyse des extraits d'orange sanguine.....	105

Liste des tableaux

Tableau I. Les principaux producteurs d'orange dans la région méditerranéenne (FAO, 2021).....	11
Tableau II. Composition chimique de l'orange.	11
Tableau III. Diverses mesures statistiques utilisées pour évaluer l'ajustement du modèle (Inyang et al., 2018).	41
Tableau IV. Valeurs des constantes géométriques en fonction de la géométrie du produit (Erbay & Icier, 2010)	43
Tableau V. Modèles mathématiques de courbes de séchage cités par divers auteurs.....	50
Tableau VI: Analyse statistique des paramètres de séchage.....	62
Tableau VII Les valeurs des constantes et coefficients de séchage et les paramètres statistiques des meilleurs modèles du séchage convectif.	63
Tableau VIII Les valeurs des constantes et des coefficients de séchage et les paramètres statistiques des meilleurs modèles du séchage micro-onde.	64
Tableau IX . Activité de l'eau des poudres séchées de <i>Citrus Sinensis [L.] Osbeck</i>	79
Tableau X. Teinte, indice de couleur et pourcentage de la couleur des extraits polyphénoliques des poudres de l'orange sanguine.	87

INTRODUCTION

Introduction

L'arboriculture fruitière fait partie intégrante de la vie économique et sociale des pays du monde entier. Les agrumes, également connus sous le nom d'Hespérides dans la mythologie grecque, sont connus pour leurs diversités dans les familles et les ordres. La culture des agrumes dans les pays du bassin méditerranéen est diversifiée, tant au niveau des cultivars (oranger, mandarinier, clémentine, pomelo, citron, citron vert, pamplemousse, pour ne citer que les exemples les plus courants), qui reflète la richesse et la variabilité d'agrumes, du fait de l'extension de cette culture (Abouo, Sadat, Akmel, Assidjo, & Amani, 2016).

Parmi les agrumes, l'orange est l'un des fruits les plus consommés au monde, qui peut être consommé frais ou transformé (jus, confiture, marmelade, etc.). Deux espèces existent : l'orange douce (*Citrus sinensis*) du Portugal ou de Malte, et l'orange amère (*Citrus aurantium*) de la bigarade ou de Séville. Les oranges sanguines sont l'un des quatre groupes de l'espèce orange douce *Citrus sinensis*, qui se distinguent par leur saveur inhabituelle et par leur potentiel à développer des taches rouges dans la chaire d'où leur appellation : oranges sanguines (Boullard, 2001).

Riches en phytoconstituants antioxydants, les oranges sanguines contiennent des niveaux élevés de caroténoïdes tels que le bêta-carotène, l'acide ascorbique et les flavonoïdes (Farnworth, Lagace, Couture, Yaylayan, & Stewart, 2001), pouvant ralentir ou empêcher l'oxydation d'autres molécules et protéger les cellules des dommages causés par des molécules instables appelées radicaux libres (Alene, 2016).

Le séchage est l'un des plus anciens procédés de conservation des fruits et légumes et constitue une étape importante dans la transformation des aliments. (Kayisoglu & Ertekin, 2011). Il est défini comme l'élimination de l'humidité d'un produit par la chaleur, qui confère à un produit un niveau d'humidité acceptable afin de prévenir la détérioration de la commercialisation dans une certaine période de temps, un stockage sûr, le traitement ou le transport (Chukwuezie, Nwakuba, Asoegwu, & Nwaigwe, 2017). Il est conçu pour protéger contre la détérioration microbologique et chimique, prolongeant ainsi la durée de conservation tout en réduisant de l'espace et du poids (Çelen, Haksever, & Moralar, 2017).

Le séchage par convection est la méthode de déshydratation la plus courante car elle est simple et facile à contrôler. Cependant, le processus de convection à long terme consomme beaucoup

d'énergie et provoque l'effondrement de la structure cellulaire pendant le processus de séchage, ce qui entraîne une diminution de la qualité de la matrice séchée. (Sledz, Wiktor, Nowacka, & Witrowa-Rajchert, 2017). Par conséquent, l'utilisation des rayons micro-ondes pour le séchage des produits s'est généralisée, car elle minimise la perte de qualité et permet également de répartir rapidement et efficacement la chaleur dans le matériau. En plus de réduire le temps de séchage et d'économiser de l'énergie lors du séchage, un produit de haute qualité est également obtenu grâce au séchage par micro-ondes (Ilknur Alibas & Kacar, 2016). Le séchage par micro-ondes de divers produits alimentaires a également montré d'excellents résultats. Par exemple, jusqu'à 25 - 90 % de réduction du temps de séchage, jusqu'à 400 - 800 % d'augmentation du taux de séchage et 32 - 71 % de réduction de la consommation d'énergie par rapport aux techniques de séchage conventionnelles, qualité du produit supérieure, encore meilleure que dans le cas des aliments lyophilisés, moins d'espace requis et meilleur contrôle de l'ensemble du processus (Moses, Norton, Alagusundaram, & Tiwari, 2014). A ces avantages s'ajoutent le taux de séchage améliorés, contrôle précis, temps de démarrage et d'arrêt rapides, encombrement réduit de l'équipement, etc (Jangam, 2011).

Plusieurs études décrivent l'utilisation des micro-ondes pour sécher les fruits et légumes, comme les haricots verts tranchés (Doymaz & Sahin, 2016), le poivron (Hosain Darvishi, Asl, et al., 2014), les tranches de kiwi (Hosain Darvishi, Zarein, & Farhudi, 2016) et les tranches de pomme (Çelen et al., 2017), ainsi que le séchage des plantes : *Hypericum perforatum L.* (Ilknur Alibas & Kacar, 2016) et le soja vert (Cao et al., 2017).

L'un des aspects les plus importants de la technologie de séchage, en particulier des processus industriels, est la modélisation du processus de séchage (Khazaei & Daneshmandi, 2007). Divers modèles mathématiques décrivant le mécanisme de séchage ont été proposés pour l'optimisation du processus et la conception de sècheurs efficaces. Au fil du temps, les modèles développés ont été appliqués à des calculs impliquant la conception et la construction de nouveaux systèmes de séchage, l'optimisation du processus de séchage et la description de l'ensemble du comportement de séchage, y compris les macro et micro-échelles combinées du transport de masse et de chaleur. Il est donc essentiel de comprendre le concept fondamental de la modélisation et de la cinétique du séchage des fruits et légumes (Daniel I Onwude, Norhashila Hashim, Rimfiel B Janius, Nazmi Mat Nawi, & Khalina Abdan, 2016). De même, la prédiction des taux de séchage pour le séchage en couche mince et les paramètres de diffusion de l'humidité des légumes et des fruits sont des composants importants des modèles de simulation

du séchage et sont essentiels pour une analyse efficace du transfert d'humidité (Hosain Darvishi, Asl, et al., 2014).

Plusieurs études ont abordé l'utilisation des micro-ondes dans la déshydratation des fruits et légumes ainsi que la modélisation de cinétiques comme les tranches de carottes (Lin, Durance, & Scaman, 1998), les tranches de pomme de terre (Reyes, Ceron, Zuniga, & Moyano, 2007), les fruits de Sorbus (Lüle & Koyuncu, 2015), les myrtilles (Zielinska & Markowski, 2016), les bananes croustillantes (Monteiro, Carciofi, & Laurindo, 2016), les tranches de citron (Kesbi, Sadeghi, & Mireei, 2016), les amandes de pistaches (Jahanbakhshi, Kaveh, Taghinezhad, & Rasooli Sharabiani, 2020) et les fleurs de bananier (Jha, Meghwal, & Prabhakar, 2021).

Bien que des études antérieures sur le séchage de la pelure, des feuilles et de la chair des agrumes (Hosain Darvishi, Khoshtaghaza, & Minaei, 2014; H. Darvishi, Mohammadi, Fadavi, Koushesh Saba, & Behrooz-Khazaei, 2019; Deng et al., 2019; Ghanem, Mihoubi, Bonazzi, Kechaou, & Boudhrioua, 2018; Talens, Castro-Giraldez, & Fito, 2016; Tasirin et al., 2014; Yildiz & İzli, 2019) ont été rapporté. Aussi les travaux de I. Alibas and Yilmaz (2021), ont étudié le séchage par micro-ondes et étuve en fournissant des résultats sur les propriétés thermiques des tranches d'orange, l'effet du séchage sur certains paramètres phytochimiques (paramètres de couleur L, a, b, C, α° et ΔE , indice de brunissement (BI), indice de blanchiment (WI) et acide ascorbique), et la modélisation à l'aide de 21 équations de séchage en couche mince. Les résultats les plus proches des données expérimentales ont été obtenus en utilisant l'équation modifiée de Henderson et Pabis pour toutes les puissances du micro-onde et toutes les températures du séchage convectif. Alibas et ses collaborateurs ont calculé les diffusions effectives d'humidité ($3,277 \times 10^{-09}$ à $1,221 \times 10^{-07}$ à 90 et 1000 W, et $2,702 \times 10^{-09}$ à $1,362 \times 10^{-08}$ à 50 et 125 °C), et l'énergie d'activation en utilisant les données de séchage. Certaines propriétés thermiques comme la chaleur spécifique, la diffusivité thermique, la conductivité thermique, et l'effusivité thermique ont été calculées et enregistrées comme diminuant dans toutes les propriétés thermiques avec le séchage. Après avoir calculé la consommation énergétique des deux méthodes de séchage, Alibas et Yilmaz ont observé que le séchage par micro-ondes était le plus efficace. Ils ont conclu que la méthode de déshydratation la plus appropriée est les micro-ondes à des puissances moyennes de 350 et 500 W, compte tenu des paramètres de séchage et de qualité.

A notre connaissance, aucun travail n'a été rapporté dans la littérature sur la valorisation de l'orange sanguine (*Citrus sinensis* [L.] Osbeck) réalisée avec zéro déchet, et son séchage en

couche mince assisté par micro-onde ainsi que la comparaison de ce procédé avec le séchage convectif par modélisation avec 38 modèles. Cependant, les auteurs ci-dessus n'ont pas abordé la consommation énergétique, ce qui permet l'identification du meilleur procédé de séchage en termes d'efficacité énergétique. Ces informations sont nécessaires aux industriels pour une gestion efficace des techniques de séchage et une meilleure utilisation de l'énergie (Mouhoubi et al., 2020).

L'objectif de cette recherche est d'étudier et de comparer le comportement de déshydratation des tranches d'orange sanguine dans des conditions de séchage par micro-onde ventilée (de 200 à 1000 W) et par étuve ventilée (de 40 à 120 °C), de sélectionner le meilleur modèle parmi les 38 modèles mathématiques de séchage cités dans la littérature qui décrivent le phénomène, de décrire le comportement d'élimination de l'humidité et d'évaluer l'évolution de la cinétique du taux de séchage et sa variation avec la teneur en eau, et enfin de calculer les diffusivités effectives, les énergies d'activation et de consommation, tout en étudiant l'effet sur la qualité et la composition phyto-chimique.

À cet effet, le travail de cette thèse sera présenté en 02 parties :

- La première est l'étude bibliographique, qui est se divise en deux parties :
 - Informations générales sur les agrumes et l'orange sanguine ;
 - Informations générales sur le séchage, les cinétiques du séchage et la modélisation.
- La deuxième partie illustre la partie expérimentale et est à son tour subdivisée en deux parties :
 - Cinétique du séchage et modélisation, qui comprend :
 - Le suivi de la cinétique de séchage en couche mince des tranches d'orange sanguine par deux méthodes : convective et micro-ondes dont la comparaison sera basée sur les paramètres cinétiques, la teneur en eau et les activités de l'eau.
 - La modélisation des cinétiques de séchage établies, et évaluation de leur diffusivité effective de l'humidité, de l'énergie d'activation et de l'énergie de consommation.
 - Effet du séchage sur la valeur nutritionnelle des tranches d'orange sanguine séchées à différents procédés, et évaluation de certaines activités biologiques des poudres obtenues après séchage.

Enfin, notre manuscrit est ponctué d'une conclusion générale et de perspectives possibles.

SYNTHÈSE

BIBLIOGRAPHIQUE

PARTIE A :

GÉNÉRALITÉS SUR LES

AGRUMES ET L'ORANGE

SANGUINE

PARTIE A : Généralités sur les agrumes et l'orange sanguine

I Les agrumes

I.1 Définition

Le mot agrume vient du latin *acrumen* qui dans l'antiquité était donné aux arbres à fruits acides (Hamidouche & Belhamiche, 2017). Les agrumes incluent les oranges, les pamplemousses, les mandarines, les clémentines et les citronniers. En botanique, les agrumes appartiennent à la famille des Rutaceae (M'Hiri, 2015).

I.2 Origine géographique et distribution

Les agrumes sont originaires d'Asie du Sud-Est, en particulier du nord du Myanmar et de la région d'Assam. Ils sont ensuite répartis dans des centres secondaires à l'ouest (sud de l'Himalaya et Inde), à l'est (sud de la Chine) et au sud (péninsule d'Indochine). Les agrumes ont deux autres origines secondaires, régions côtières du sud de la Chine (îles de Hainan, Taïwan, sud du Japon) et de l'insulindie jusqu'aux îles des Samoa et des Fidji (Bousbia, 2011).

La culture des agrumes semble remonter au 1^{er} millénaire av J.-C. Présent en Inde et en Chine. Mais il ne se serait répandu dans le monde entier qu'aux 19^{ème} et 20^{ème} siècle. Les premiers agrumes introduits dans le bassin méditerranéen sont ceux de l'époque d'Alexandre le Grand (3^{ème} siècle avant J.-C.), utilisés comme cosmétiques et médicaments (LOUSSERT, 1989b). À partir du Xe siècle, les marins arabes les font répandre le long de la côte orientale de l'Afrique jusqu'au Mozambique. Christophe Colomb les introduisit en Haïti lors de son deuxième voyage (1493), d'où ils furent distribués au Mexique (1518) puis aux États-Unis (1569-1890). À noter que contrairement aux autres agrumes (dont le pamplemousse), le pomelo est originaire de l'île Barbade aux Caraïbes. L'oranger, le bigaradier et le citronnier semblent s'être dirigés vers l'ouest au cours du 10^{ème} siècle, lorsque des échanges commerciaux s'opéraient entre le bassin méditerranéen et l'Asie. Les navigateurs anglo-néerlandais introduisent les premiers agrumes dans la province du Cap en Afrique du Sud en 1654 (Bouchra & Souhila, 2015). En dernier, les mandarines et les clémentines sont apparues pour la première fois en Europe aux 18^{ème} et 19^{ème} siècle, respectivement. La consommation d'agrumes peut sembler banale aujourd'hui, mais notons que jusqu'au milieu du 20^{ème} siècle, les oranges étaient considérées comme un produit de luxe et étaient souvent offertes aux enfants à Noël (Dugrand-Judek, 2015).

En Algérie, les invasions arabes avaient bien introduit le bigaradier dans l'empire des Almohades. Toutefois, il embellisse déjà, pendant la période Ottomane (du 16^{ème} au 18^{ème} siècle), les jardins des Beys. L'oranger y fut sans doute apporté quelques siècles après par les maures d'Andalousie. Au début de la colonisation en 1850, le mandarinier fut introduit en Algérie par M. Harby. Au 19^{ème} siècle, le père Clément de l'orphelinat agricole de Misserghin, effectuant un croisement de mandarinier (Commun) avec le bigaradier (Granito) découvrit (Clémentine) (Loubna & Sara, 2018).

I.3 Description botanique

Les agrumes sont des angiospermes dicotylédones appartenant à l'ordre des Sapindales et à la famille des Rutacées. Cette dernière comprend environ 160 genres et 1900 espèces végétales. Le groupe des agrumes comprend six genres sexuellement compatibles: Citrus, Fortunella, Poncirus, Microcitrus, Eremocitrus et Clymenia (Dugrand-Judek, 2015).

Les agrumes sont des arbres ou arbustes allant de trois à quinze mètres de haut. Leurs feuilles sont luisantes, simples ou trifoliées, persistantes et présentent généralement un pétiole ailé (figure 1). Les branches ont souvent des épines plus ou moins grosses. Les fleurs sont hermaphrodites, généralement à 5 pétales blancs (parfois rosâtres) et 20 à 40 étamines entourant l'ovaire, attachées à un disque de nectar (Praloran, 1971).). Les feuilles et les fleurs produisent une essence avec un arôme unique.



Figure 1. Branche, fleurs et fruits d'oranger doux (Köhler, 1887)

Différentes variétés d'agrumes ont des tailles et des formes de fruits différentes. Ils sont constitués de trois couches concentriques (figure 2): deux forment l'écorce (péricarpe) et une forme la pulpe (endocarpe) (Dugrand-Judek, 2015).

- **Ecorce**

Se décline en deux parties :

- **L'épicarpe** : Il s'agit d'une couche externe colorée appelée "flavedo". Il contient des glandes à huile essentielle et représente 8 à 10 % du fruit.

- **Le mésocarpe** : Il s'agit d'une couche interne blanche appelée « albédo », de consistance plus ou moins spongieuse par rapport à la taille du fruit, représentant 12 à 30 % du fruit.

- **Pulpe**

C'est la portion comestible divisée en quartiers juteux dont le nombre varie de neuf à onze. Il consiste en une série de poils charnus ou de vésicules contenant le jus. Les segments sont attachés à la columelle, la partie centrale du fruit. Ils sont souvent plus ou moins acides et sucrés ou amers et constituent 50 à 80 % du fruit.

- **Pépins**

Se trouvent près du centre de l'orange, ils ont une teneur élevée en huile ; ils représentent 0 à 4% du fruit.

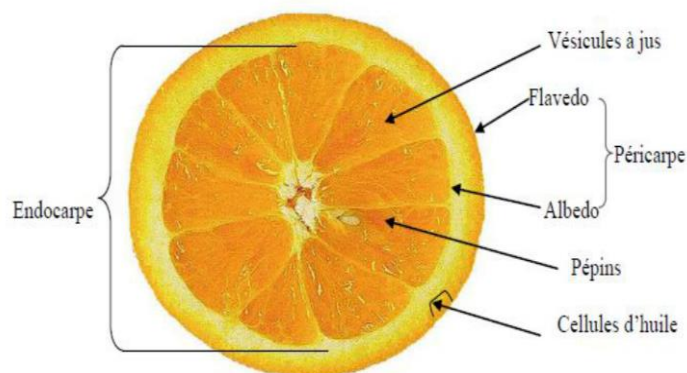


Figure 2. Coupe équatoriale d'une orange (Goudeau et al., 2008).

I.4 Utilisations

Les agrumes sont soit consommés comme fruits, soit transformés en jus et autres produits. En général, les jus sont fabriqués à partir de fruits défectueux et ne peuvent être vendus comme tels. Un tiers de la production mondiale d'agrumes est transformé de cette façon. Divers produits

tels que les huiles essentielles (utilisées dans les médicaments, les cosmétiques et les produits ménagers), les confitures, les écorces confites, l'alcool et les fleurs d'oranger résultent également de ces transformations. D'autres sous-produits moins connus tels que les huiles aromatisées aux agrumes sont utilisés en cuisine, la pectine des fruits est utilisée pour faire des confitures, et enfin la pulpe est utilisée comme aliment des ruminants et comme sous-produit du limonène (Dugrand-Judek, 2015).

Leurs écorces sont riches en composés bioactifs, dont l'extraction des composés phénoliques principalement utilisée dans l'alimentation, mais aussi dans les industries pharmaceutiques et cosmétiques comme antioxydants naturels et conservateurs, a suscité un grand intérêt scientifique (Ramful, Baborun, Bourdon, Tarnus, & Aruoma, 2010), d'autres applications telles que la chimie et la conception de nouveaux matériaux où des molécules ont été extraites tout en conservant leur fonctionnalité n'est possible que si certains chercheurs s'intéressent aux méthodes d'extraction utilisant des techniques dites conventionnelles et non conventionnelles, basées sur de nouvelles techniques d'extraction dites « vertes ». Ces techniques sont utilisées pour améliorer le processus d'extraction et améliorer les rendements. Comme l'extraction assistée par micro-ondes, par ultrasons, ou l'extraction liquide sous pression (M'Hiri, 2015).

II L'orange sanguine

II.1 Définition

Le terme "orange" pour les fruits est apparu au 13^{ème} siècle. Dérivé du mot arabe « narandj », qui signifie « le fruit préféré des éléphants ». L'ajout du « o » au nom arabe a été influencé par le nom de la ville orange (Liu, Heying, & Tanumihardjo, 2012).

Placer quatrième fruit cultivé au monde, l'orange est un fruit de forme, couleur et taille très variable, juteux, sucré, piquant et très riche en vitamine C, consommé en salades de fruits, confitures ou en jus (Bousbia, 2011).

II.2 Origine

Les oranges douces sont originaires d'Asie et leurs hybrides naturels caractéristiques (Figure 3) semblent dériver d'un croisement entre la mandarine (*Citrus reticulata* Blanco) et le pamplemousse (*Citrus grandis* L. Osbeck) (Novelli, Cristofani, Souza, & Machado, 2006).

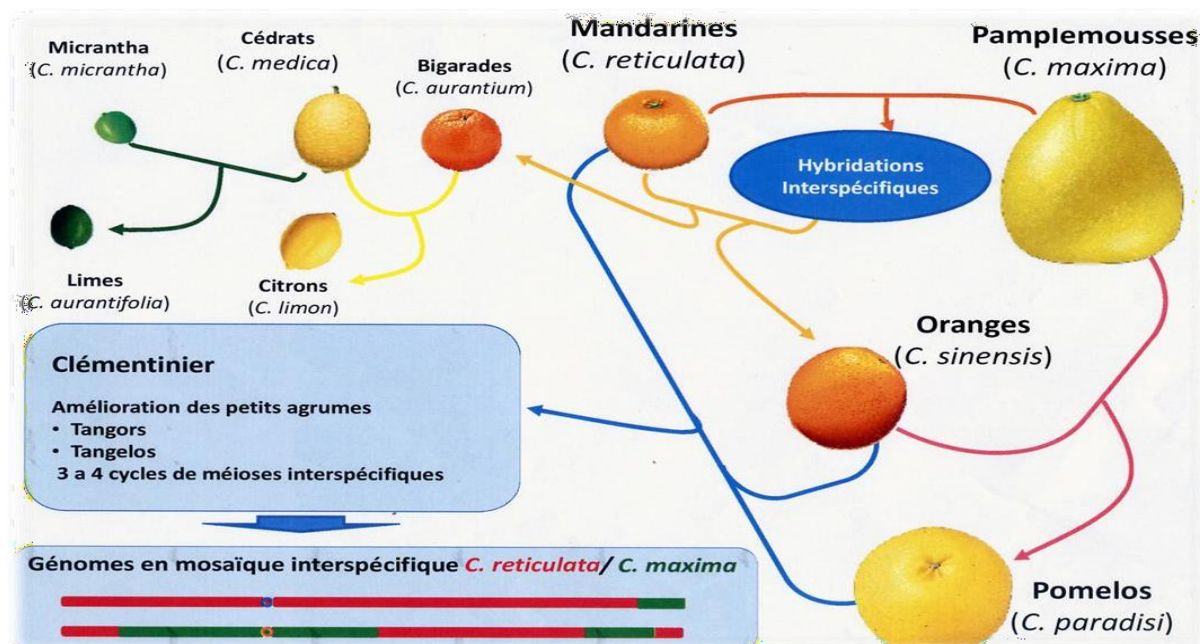


Figure 3. Origine et formes des agrumes (Nicolas, 2014).

II.3 Classification botanique

Règne : Plantae

Embranchement : Tracheobionta

Division : Magnoliophyta

Classe : Magnoliopsida

Ordre : Géraniale

Famille : Rutacées

Sous-famille Aurantioideae

Sous-tribu Citrinae

Genre : Citrus

Sous-genre Eucitrus

Nom binominal : *Citrus sinensis* (L.) Osbeck (Cronquist 1981).

II.4 Production mondiale

Selon le bulletin de l'année 2021 de l'Organisation pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), 143 755,6 milliers de tonnes sont produites pour l'année 2019, dont 76 292,6 milliers de tonnes sont des oranges (*Citrus sinensis*) (Figure 4). L'Amérique est le premier producteur dans le monde avec 41,3 % qui représente environ 30 millions de tonnes, l'Asie se classe en deuxième position avec 36,8 % de la production globale soit 27 millions de tonnes, l'Afrique (12,9 %) et l'Europe (8,4 %) occupent le dernier rang dans la production mondiale (FAO, 2021) (Figure 5).

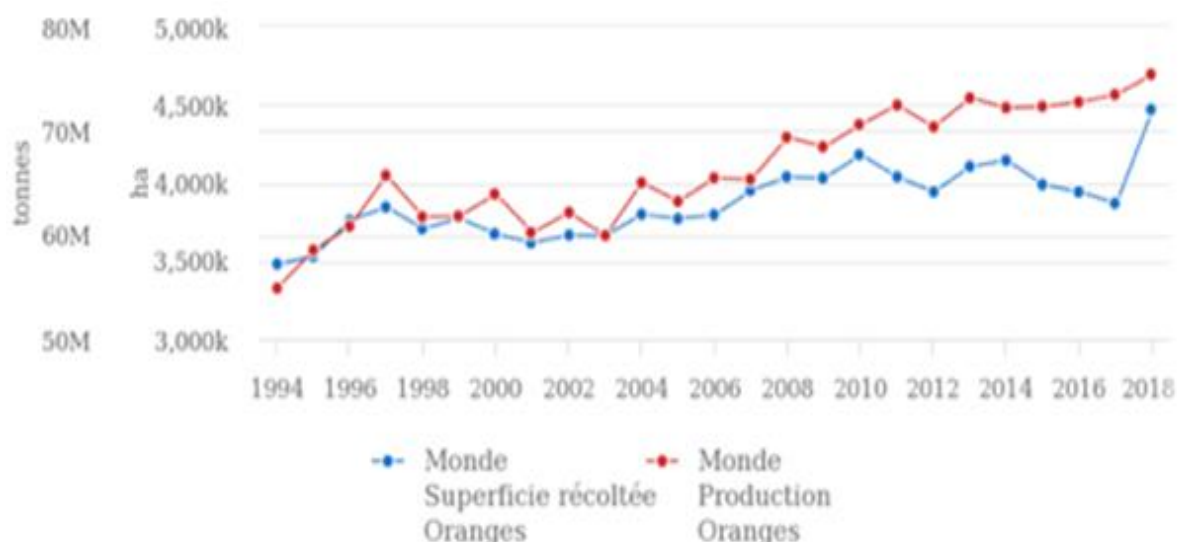


Figure 4. Production mondiale d'orange entre 1994 et 2018.

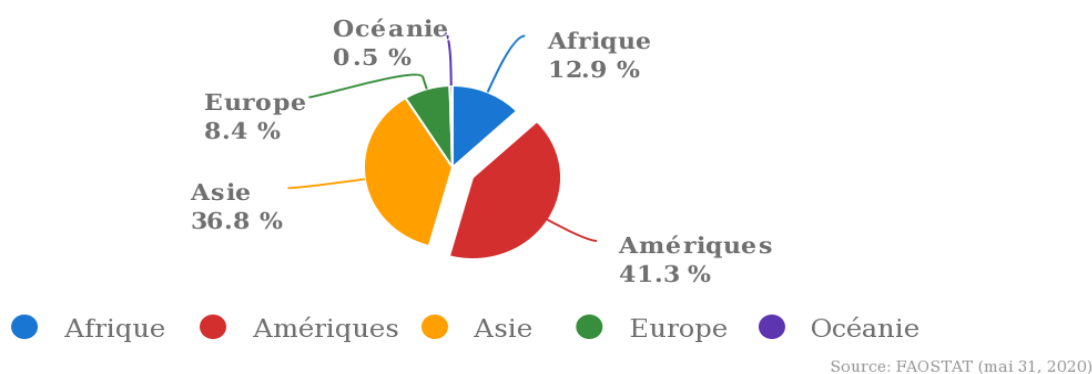


Figure 5. Les parts de la production d'orange dans le monde (FAO, 2021).

II.5 Production méditerranéenne et algérienne

L'Algérie a produit 1 593,5 milliers de tonnes d'agrumes pour l'année 2019 avec 1199,5 milliers de tonnes d'orange. Elle occupe la 5^{ème} place dans la région méditerranéenne (Tableau I), la 13^{ème} dans le monde et la 3^{ème} place dans le continent (FAO, 2021). A noter que le plus haut niveau en terme qualité est obtenu dans la région méditerranéenne, l'une des principales zones de production d'une grande variété d'agrumes frais.

Tableau I. Les principaux producteurs d'orange dans la région méditerranéenne (FAO, 2021).

Pays	Production (milliers de tonnes)
Espagne	3 226.9
Egypte	3197.0
Turquie	1 700.0
Italie	1 650.2
Algérie	1 199,5
Maroc	1182.5
Grèce	849.1
Tunisie	135.0

II.6 composition chimique

Les oranges contiennent en moyenne 12 % de glucides dont 40 % sont du saccharose, de la vitamine C, vitamines P, B1, B9, E et la provitamine A. Elles sont riches en calcium, en pectine, et joue un rôle dans la régulation du transit intestinal, elles contiennent de la flore mésophile (levures et lactobacilles) indispensable à la bonne digestion. Le jus d'orange sanguine contient des niveaux élevés de caroténoïdes tels que le bêta-carotène, l'acide ascorbique, les flavonoïdes et d'autres composés présents dans le jus (Tableau II).

Tableau II. Composition chimique de l'orange.

Orange crue (valeur nutritive pour 100 g)			
Eau : 86,75 g	Cendres : 0,44 g	Fibres : 2,4 g	Valeur énergétique : 47 kcal
Glucides : 11,75 g	Sucres simples : 9,35 g	Protéines : 940 mg	Lipides : 120 mg
Oligo-éléments			
Potassium : 209 mg	Calcium : 40 mg	Phosphore : 14 mg	Magnésium : 23,5 mg
Fer : 480 µg	Zinc : 70 µg	Cuivre : 45 µg	Sodium : 2,29 mg
Vitamines			
C : 164 mg	B1 : 87 µg	B2 : 40 µg	B3 : 282 µg
B5 : 250 µg	B6 : 60 µg	B9 : 29 µg	B12 : 0 µg
A : 225 UI	Rétinol : 0 µg	E : 0,18 µg	K : 0 µg
Acides gras (mg)			
Saturés : 15	Mono-insaturés : 23	Poly-insaturés : 25	Cholestérol :

II.7 Principales variétés

Les principales variétés de l'orange : selon (Berlinet, Brat, Brillouet, & Ducruet, 2006)

II.7.1 Les oranges amères *Citrus aurantium L*

Appelées bigarades, peu comestibles et ne sert principalement qu'à faire des confitures et des huiles essentielles.

II.7.2 Les oranges douces *Citrus sinensis [L.] Osbeck*

Les plus consommées en fruits, car elles sont juteuses et sucrés. Certaines variétés sont utilisées pour faire du jus. Elles sont divisées en trois groupes :

a) Les oranges navels

Se caractérisent par l'absence de pépins et se consomment mieux en fruit de bouche. Lors du pressage, elles donnent moins de jus que les autres variétés et développent une certaine amertume, ce qui peut les rendre impropres à la production de jus.

b) Les oranges blondes

Sa variété principale est la Valencia, la première variété commerciale de tous les types d'agrumes. On les trouve dans toutes les principales régions productrices d'oranges. Les oranges blondes sont nettement moins amères lorsqu'elles sont pressées que les oranges navels. Par conséquent, ils sont principalement transformés en jus.

c) Les oranges sanguines

Les oranges sanguines sont le résultat d'une mutation génétique spontanée qui est apparue il y a plusieurs siècles dans des plantes originaires de Chine, en raison des mouvements migratoires à travers la Méditerranée (Cebadera-Miranda et al., 2019). Elles se caractérisent par la couleur de la chair dû au pigment rouge anthocyane, sensibles aux techniques d'extraction et de conservation du jus, et leur dégradation peut conférer une couleur brune indésirable au produit. Selon (Barreca et al., 2018), on distingue trois types d'orange sanguines les plus courantes :

- **La Sanguinello**

Bien qu'elle soit originaire d'Espagne, elle est cultivée aujourd'hui dans les pays méditerranéens (en particulier la région sicilienne, l'Italie et l'Espagne) ainsi qu'en Floride et au Texas aux États-Unis. Elle est juteuse de forme ovale, légèrement allongée, d'une belle couleur rouge sang attirante, sa peau est très lisse, brillante et pigmentée et n'a presque pas d'imperfections.

- **La Tarocco**

Est l'une des variétés d'oranges les plus populaires au monde en raison de sa douceur et de sa jutosité. Elle est sans pépins et possède la teneur en vitamine C la plus élevée de toutes les autres variétés d'oranges cultivées. Elle provient probablement d'une mutation du cultivar « Sanguinello ». Ces fruits sont caractérisés par une taille moyenne, une douceur et un goût remarquable. La pigmentation rouge de la chair n'est pas aussi accentuée que dans les variétés « Moro » et « Sanguinello », et pour cette raison elle est souvent appelée « demi-sang ».

- **La Moro**

Les oranges sanguines Moro *Citrus sinensis*. (L). Osbeck sont l'un des quatre groupes de l'espèce d'orange douce *Citrus sinensis*. Elles se distinguent des oranges douces par leur saveur unique et leur potentiel de pigmentation rouge de la chair et parfois de la peau dans des conditions climatiques appropriées, ainsi par la présence d'anthocyanes (H. Lee, Carter, Barros, Dezman, & Castle, 1990). Est une excellente variété précoce, ses fruits sont de taille petite à moyenne avec peu ou pas de pépins. Elle se caractérise par une saveur et un arôme intense et par une chair rouge violacée (Lo Piero, 2015). Quant à la douceur, elle est plus amère que les deux autres variétés.

Les oranges sanguines ne sont pas courantes aux États-Unis. Seule la Californie a des températures nocturnes fraîches nécessaires pour un développement de couleur adéquat et cohérent. Les oranges sanguines sont mieux connues en Méditerranée où elles sont cultivées et en Europe où elles sont commercialisées (H. Lee et al., 1990).



Figure 6. Photographie d'une coupe longitudinale d'une orange sanguine

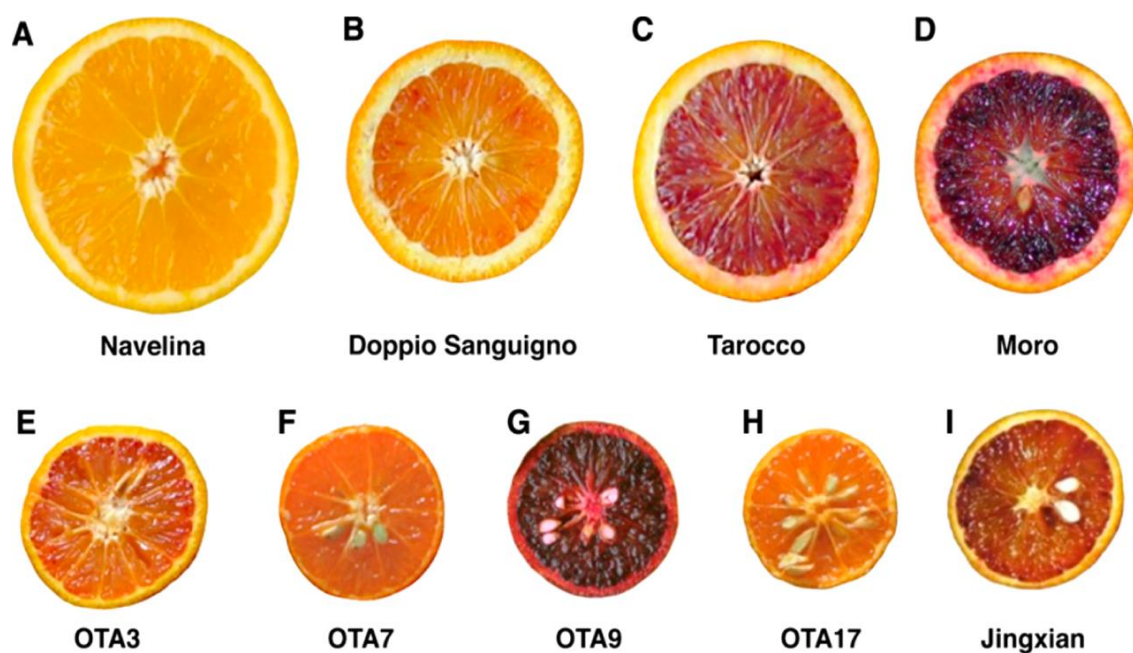


Figure 7 . Phénotypes des variétés et des hybrides d'oranges (Lo Piero, 2015)

II.8 Exigences climatiques

II.8.1 Climat

a) La température

Les orangers sont des arbres à climat chaud, cependant, les températures minimales et maximales sont des facteurs limitants. La température zéro végétatif est de 13°C, et la température optimale de croissance est de 25 à 26°C, au-dessus de cette température, l'activité diminue et s'arrête vers 38 à 40°C (Loussert, 1989).

b) La pluviométrie

Les orangers sont des arbres à feuilles persistantes avec de fortes demandes en eau allant de 900 à 1200 mm par an.

c) L'humidité de l'air :

Lorsque la transpiration est élevée, la demande en eau augmente. Les vents chauds et secs exacerbent la faible humidité de l'air, causant ainsi des brûlures aux feuilles et aux fruits.

II.8.2 Sol

Le sol est le support de l'arbre, qui puise, par les racines, les éléments dont il a besoin. Les critères à considérer sont : la profondeur et l'uniformité du sol, la perméabilité, la capacité de rétention d'eau (Loussert, 1989). La composition convenable est comme suit :

- 15 à 20% d'argile.
- 15 à 20% de limon.
- 20 à 30% de sable fin.
- 30 à 50% de sable grossier.

II.9 Les antioxydants des oranges sanguines

II.9.1 Définition

Les antioxydants sont des substances qui ralentissent ou empêchent l'oxydation d'autres molécules et protègent les cellules des dommages des radicaux libres, soit en inhibant l'initiation des chaînes de réaction, soit en inactivant directement les ROS (l'espèce rectifiée à l'oxygène). Selon le mode d'action, Les antioxydants peuvent être classés en systèmes enzymatiques, inhibiteurs d'oxydases, chélateurs de métaux et piègeurs de radicaux libres. Le corps possède des systèmes endogènes dédiés à cet effet protecteur. Cependant, cette ligne de défense est facilement saturée. De nombreux antioxydants exogènes se trouvent également dans l'alimentation, apportant un soutien important dans la lutte antioxydante (Alene, 2016).

II.9.2 Les Caroténoïdes

La couleur de la peau et de la chair des oranges mûres est due aux substances naturelles liposolubles pigmentées dites caroténoïdes (Boubekri, 2014). Ils se répartissent généralement en deux groupes principaux, les caroténoïdes hydrocarbonés appelés carotènes (exemple : bêta-carotène et lycopène) et les caroténoïdes contenant de l'oxygène appelés xanthophylles (exemple : Lutéine, violaxanthine) (Sharma, Mahato, Cho, & Lee, 2017).

II.9.3 La vitamines C

La vitamine C ou acide ascorbique est une molécule hydrosoluble sensible à la chaleur et à l'oxygène et nécessaire à de nombreuses fonctions physiologiques de l'organisme. L'acide ascorbique est synthétisé par la plupart des animaux et des plantes à l'exception des singes et des humains en raison du manque de gulonolactone oxydase (Boubekri, 2014).

II.9.4 Les composés phénoliques

Les composés phénoliques sont la classe principale des métabolites secondaires chez les végétaux, Ils sont classés en acides phénoliques et en polyphénols qui sont à leurs tours classés en flavonoïdes et non-flavonoïdes (Belmehdi & Boudries, 2018). Ces composés sont principalement synthétisés à partir de l'acide aminé phénylalanine qui est converti en acide cinnamique, ils jouent un rôle dans la régulation de la croissance des plantes (attraction des pollinisateurs), participent aux réponses de défense pendant l'infection, l'exposition excessive au soleil, et jouent un rôle dans la pigmentation, etc. (Kubalt, 2016). Ils se caractérisent par un cycle aromatique et d'un ou plusieurs groupes phénoliques dans leur structure, et diffèrent par le nombre et la position des groupes hydroxyle et la présence de différents substituants, tels que des acides organiques et des groupes alkyles. Les composés phénoliques ont plus de 8000 structures identifiées (M'Hiri, 2015).

a) Les flavonoïdes

Le nom flavonoïde proviendrait du terme flavedo, désignant la couche externe des écorces d'orange, ou plutôt ce terme a été prêté du mot latin flavus qui désigne jaune. Les flavonoïdes sont des métabolites des végétaux dotés de propriétés antioxydantes efficaces (Dragan et al., 2002). Ils constituent la classe la plus importante des composés phénoliques (plus de 5000 composés), et sont principalement classés en flavones, flavanols (catéchines), isoflavones, flavonols et flavanones (Yang, Kotani, Arai, & Kusu, 2001).

b) Les anthocyanes

Ce sont les pigments donnant la coloration rouge, violette et bleue (Linden et Lorient, 1994). Bien que certaines colorations de quelques fruits (exemples : orange et tomate) soient causées par les caroténoïdes. Ces derniers sont masqués ou partiellement masqués par la présence des anthocyanes (Lee, Carter, Barros, Dezman, & Castle, 1990). En termes de fréquence de présence dans les fruits, les différents types d'anthocyanes sont : cyanidine, delphinidine, péonidine, pélargonidine, pétunine et malvidine (Robards & Antolovich, 1997).

c) Les acides phénoliques

Les acides phénoliques représentent environ un tiers des composés polyphénoliques du régime alimentaire et comprennent deux classes principales de dérivés d'acide hydroxybenzoïque (acide protocatéchique, acide gallique, acide p-hydroxybenzoïque) et de dérivés d'acide hydroxycinnamique (acide chlorogénique, acide caféïque, acide sinapique, acide coumarique.).

II.10 Intérêt technologique et transformation

La consommation et la transformation des agrumes, en particulier des oranges, produisent de grande masse de sous-produits tels que les pelures, la pulpe et les pépins. Ceux-ci peuvent atteindre 50 % à 60 % du poids total du fruit et devenir une source de pollution environnementale (Velasco et al., 2017). Le principal composant des déchets de transformation des oranges est l'écorce, qui est utilisée comme mélasse pour l'alimentation animale, la production de fibres et le carburant (Lagha-Benamrouche, Addar, Boudherhem, Tani, & Madani, 2018). Il se trouve que l'écorce est plus riche en polyphénols que la partie comestible (Omoba, Obafaye, Salawu, Boligon, & Athayde, 2015). L'extraction reste une étape difficile car les composés phénoliques sont sensibles à la chaleur et la lumière ce qui entraîne leur dégradation et l'altération de leurs activités antioxydantes (Manach, Scalbert, Morand, Rémésy, & Jiménez, 2004). Ainsi, le processus d'extraction utilisé doit être effectué dans des conditions douces pour éviter la dégradation des composés phénoliques tout en minimisant les coûts. La qualité alimentaire ou thérapeutique des extraits naturels est liée à l'efficacité et à la sélectivité du procédé d'extraction utilisé (M'Hiri, 2015).

PARTIE B :

SÉCHAGE ET MODÉLISATION

Partie B : Séchage et modélisation

I. Séchage

Grâce aux améliorations significatives des technologies agricoles, les ressources alimentaires sont abondantes dans de nombreux pays du monde. Grâce au transport mondial, les aliments et peuvent être échangés sur de plus grandes distances que jamais, mais la nécessité de garantir la sécurité et la salubrité des aliments reste primordiale (X. D. Chen & Mujumdar, 2009).

La plupart des aliments sont très périssables, c'est pourquoi la connaissance de la durée de conservation est essentielle si les ingrédients doivent être transportés sur de grandes distances et stockés dans des entrepôts, ou par le consommateur, pour des périodes importantes. Le séchage est de loin la méthode d'exploitation à grande échelle la plus utile pour la conservation d'aliments solides pendant de longues périodes. Le séchage lui-même peut être considéré comme un traitement thermique car le nombre de micro-organismes vivants peut être réduit pendant le séchage. La teneur en éléments nutritifs, en revanche, doit être maintenue au niveau le plus élevé possible. Les opérations de séchage doivent donc être contrôlées et optimisées avec précision afin de produire un produit de bonne qualité, présentant le plus haut niveau de rétention des nutriments et de saveur, tout en maintenant la sécurité microbienne (X. D. Chen & Mujumdar, 2009).

I.1 Définition

Le séchage est un processus de conservation d'aliments très ancien. Il permet la conversion de produits périssables en produits stables en réduisant leurs activité de l'eau en dessous de 0,5 (BONAZZI & BIMBENET, 2003) réduisant ainsi la croissance de micro-organismes et les réactions chimiques indésirables telles que le brunissement enzymatique, à fin de prolonger la durée de vie du produit (Miraei Ashtiani, Rafiee, Mohebi Morad, & Martynenko, 2022).

Selon Perino and Chemat (2015) : Le séchage peut être défini comme le transfert simultané de chaleur et masse dans lequel l'activité de l'eau de l'aliment est réduite en raison de l'élimination de l'eau. D'autres définitions peuvent s'ajouter, selon El Mokretar, Miri, and Belhamel (2004) Le séchage est soit une méthode de conservation, soit une étape de la transformation. Il est utilisé aussi bien dans le monde rural par le séchage des produits agricoles que dans le monde industriel par l'industrie agro-alimentaire, le textile, etc. Les biologistes ont découvert qu'en maintenant le taux d'humidité des aliments entre 10 et 20 %, les bactéries, les champignons et les enzymes sont presque entièrement neutralisés (Abouo et al., 2016).

I.2 Avantages et inconvénients du séchage**I.2.1 Avantages**

Cette méthode présente de nombreux avantages, elle inactive les enzymes, détruit les micro-organismes, réduit la saisonnalité de certaines activités agricoles ou industrielles, réduit la masse et le volume des aliments, facilite leur transport, et finalement donner une présentation, ou une fonctionnalité nouvelle au produit (Brennan & Grandison, 2006; Hnin, Zhang, Ju, & Wang, 2021; Kouhila et al., 2020). Le séchage des fruits et légumes peut améliorer la digestibilité, accroître l'acceptation par les consommateurs de produits aux formes séduisantes, valoriser les produits locaux et diversifier les produits existants (Al Haddad, 2007; Ilknur Alibas, 2007).

I.2.2 Inconvénients

Comme tous les traitements thermiques, le séchage peut entraîner, en particulier, des pertes d'arômes, de vitamines et de pigments, insolubilisation des protéines entraînant le goût de cuit, des réactions de brunissement, des durcissements superficiels, concentration de la coloration, des modifications irréversibles de texture et donc de capacité à la réhydratation, des pertes de constituants volatils, la modification de la répartition de l'humidité dans le produit et le coût énergétique élevé (Brennan & Grandison, 2006).

Le séchage présente généralement moins d'inconvénients globaux que les autres méthodes de stockage (congélation, appertisation ou traitement aseptique).

I.3 Les voies de séchage

L'élimination d'eau peut se faire de trois manières :

I.3.1 Voie mécanique

Se réalise par un simple transfert de matière mais pas de chaleur, exemple : filtration, égouttage centrifugation, pressage, essorage (Bonazzi & Bimbenet, 2008).

I.3.2 Voie chimique

Méthode d'extraction basée sur les interactions chimiques, physiques ou physicochimiques, telle que la déshydratation imprégnée par immersion, (exemple : chlorure de calcium) (Schnell, 1983).

I.5.3 Voie thermique

Ce type d'opération est essentiellement un transfert de masse nécessitant une pré-activation de l'eau par une certaine quantité d'énergie apportée par le transfert de chaleur (BONAZZI & BIMBENET, 2003).

I.4 Modes de séchage

Deux mécanismes peuvent être mis en œuvre pour évaporer l'eau du produit : l'ébullition ou l'entraînement. L'idée la plus simple est de porter le produit au point d'ébullition de l'eau puis de l'évaporer. Cependant, on préfère souvent utiliser l'air comme gaz propulseur et travailler à des températures plus basses afin d'éliminer complètement l'humidité sans trop dégrader le produit. Quelle que soit la méthode de séchage, la pression de vapeur d'eau dans le produit détermine l'échange entre l'air et le produit.

I.4.1 Séchage par entrainement

Lorsqu'un produit humide est placé dans un flux de gaz suffisamment chaud et sec (généralement de l'air), une différence de température et de pression partielle s'établit telle que : l'air fournit au produit au moins une partie de l'énergie nécessaire à la vaporisation ; L'eau s'évapore au lieu de bouillir en raison de la pression partielle inférieure de l'eau. La vapeur d'eau se déplace du produit vers l'environnement par conduction et convection puis est entraînée dans l'air. Le produit s'ajuste spontanément à une température telle que le transfert de chaleur permet l'évaporation d'un débit d'eau égal à celui capable de traverser la couche limite (si seulement une petite fraction de la chaleur est utilisée pour chauffer le produit) (Bonazzi & Bimbenet, 2008).

I.4.2 Séchage par ébullition

L'ébullition se produit lorsque la température du produit augmente à un niveau tel que la pression de vapeur du produit est égale à la pression de vapeur totale (par conduction sur des surfaces chaudes, rayonnement, vapeur surchauffée, immersion dans de l'huile chaude).

D'après cette définition, le point d'ébullition dépend de la pression totale (inférieure sous vide qu'à pression atmosphérique) et de l'activité de l'eau du produit (augmente avec la diminution de a_w) (Bonazzi & Bimbenet, 2008).

I.5 Modes de transfert de chaleur et de matière

Le processus de séchage est un processus complexe qui implique des transferts simultanés de chaleur et de matière (principalement de l'eau), ainsi que des modifications physiques, chimiques et de structure de la matrice.

I.5.1. Transfert interne de matière

L'eau s'écoule de l'intérieur du produit vers sa surface sous l'effet de divers mécanismes qui peuvent interagir les uns avec les autres. Il est bien connu que l'un des mécanismes fondamentaux dans les produits poreux riches en eau est le transport capillaire. Si le transfert de chaleur et l'écoulement des fluides interviennent dans le conditionnement et la conservation, où le transfert d'humidité, de vapeurs, de gaz et de composés aromatiques affecte la qualité, la résistance au transfert de matière sert de facteur limitant dans ces opérations physiques.

Les diverses structures physiques des denrées alimentaires et leurs compositions chimiques variées pour une même denrée qui se modifient tout au long du processus de transformation rendent difficile l'application des théories de transfert de masse aux processus de transformation des aliments.

Il convient de noter que la migration de l'eau (liquide ou vapeur) peut également se produire par filtration à travers un produit poreux sous l'influence d'une différence de pression entre l'intérieur et la surface. Au cours du processus de séchage, l'eau est transférée à la surface du produit sous forme de liquide (eau libre) ou de vapeur (eau libre et eau liée). Lorsqu'il y a suffisamment d'eau à l'intérieur du produit, elle diffuse de l'intérieur vers la surface en raison du gradient de concentration. Ce sont les forces capillaires qui assurent le transfert pour les faibles tensions d'eau. Alors que l'eau liquide est présente sous forme d'îlots discontinus et que l'eau liée s'est dissoute, ces deux fluides se diffusent par le gradient de pression partielle de vapeur d'eau (Al Haddad, 2007).

a) Migration de vapeur d'eau

La vapeur est transportée par convection à l'intérieur des pores et par diffusion à travers les parois séparant les pores. Lors du séchage, la diffusion de vapeur est assurée par un gradient de pression de vapeur (Cengel, Klein, & Beckman, 1998).

b) Teneur en eau

Aucun produit agricole n'est complètement sec dans la nature, l'eau est toujours présente. Deux méthodes sont utilisées pour calculer la teneur en humidité : Sur base humide ou sèche. La

teneur en humidité peut également être exprimée en rapport décimal ou en pourcentage (Wilhelm, Suter, & Brusewitz, 2004).

c) Activité de l'eau

La disponibilité de l'eau dans une matrice est le meilleur indicateur de sa périssabilité qui est favorisé par des activités de dégradation telles que l'action microbienne. L'activité de l'eau est utilisée dans l'industrie alimentaire comme un indicateur de la disponibilité de l'eau dans un produit (Wilhelm et al., 2004).

d) Taux d'humidité à l'équilibre

Un corps exposé à une température et une humidité relative constantes pendant une période prolongée atteindra éventuellement une teneur en humidité qui s'équilibre avec l'air ambiant. Cela ne signifie pas que le corps et l'air ont la même quantité d'eau, mais simplement qu'il existe un équilibre tel qu'il n'y a pas d'échange net d'eau entre le corps et l'air. Cette teneur en humidité d'équilibre est en fonction de l'humidité relative, de la température, et du produit.

1.5.2. Le transfert interne de chaleur

Le transfert de chaleur est l'un des types d'échange d'énergie les plus courants. Dès qu'il y a une différence de température entre les deux systèmes, il intervient naturellement entre eux, quel que soit le milieu qui les sépare (Cengel et al., 1998).

Le transfert de chaleur peut être défini comme le transfert d'énergie d'une zone à une autre sous l'influence d'une différence de température. Il est régi par une combinaison de lois physiques. Trois types différents de transfert de chaleur sont généralement reconnus : conduction, convection, rayonnement.

a) La conduction

La conduction est le transfert de chaleur d'une molécule à l'autre dans un corps ou dans un certain nombre de corps non réfléchissants connectés sans provoquer de mouvement du milieu ou ce mouvement intervient dans la transmission. Ce type de transfert caractérise essentiellement le transfert de chaleur à l'intérieur ou entre les solides contigus. La conduction se produit également dans les liquides et les gaz, mais son effet est mineur par rapport à la convection, dans le cas des liquides très visqueux et les gaz confinés dans des matériaux poreux, le séchage se produit alors en mode "ébullition" ou "entraînement".

b) Convection

La convection est le mode de transfert d'énergie entre une surface solide et un liquide ou un gaz adjacent en mouvement. Cela inclut les effets combinés de la conduction et du mouvement des fluides. Plus le fluide se déplace rapidement, plus le transfert de chaleur dû à la convection est important. On dit que la convection est forcée lorsqu'un fluide est forcé sur une surface par des moyens externes tels qu'un ventilateur, une pompe ou le vent. On parle de convection naturelle (ou libre) lorsque le mouvement d'un liquide est dû à des forces de flottabilité causées par des différences de densité dues à des changements de température dans le liquide (Jannot, 2008).

c) Rayonnement

Le rayonnement est l'énergie émise par la matière sous forme d'ondes électromagnétiques (photons) à la suite de modifications de la configuration électronique des atomes ou des molécules. Contrairement à la conduction et à la convection, le transfert d'énergie par rayonnement ne nécessite pas de milieu intermédiaire. En fait, le transfert d'énergie par rayonnement est rapide (à la vitesse de la lumière) et ne se désintègre pas dans le vide. Ce qui explique le cas du chauffage par les rayons infrarouges, les micro-ondes, les hautes fréquences et le séchage au soleil par la lumière directe du soleil.

I.6 Choix du procédé de séchage

Le type de séchoir utilisé pour sécher un produit particulier est basé sur la sélection d'équipements adaptés et est fait en fonction de certains facteurs (Jannot, 2003):

- Nature de la matrice (liquide, solide, pâte).
- Humidité initiale et finale.
- Flux de produit exigé.
- Sensibilité à la chaleur.
- Sécurité opérationnelle (toxicité, inflammabilité, etc.).

I.7 Phénomènes se produisant au cours du séchage

L'interaction entre l'eau et les autres constituants dépendent de la mobilité de l'humidité et des solutés, engendrant des réactions, des phénomènes mécaniques et des transformations physiques lors du séchage, du stockage et de la consommation (Bonazzi & Dumoulin, 2011a).

I.7.1 Les réactions biochimiques

Ce sont les réactions de Maillard, l'oxydation des vitamines et des graisses, la dénaturation des protéines, les réactions enzymatiques, etc. Certains prétraitements peuvent ralentir ces réactions.

Des exemples classiques sont le traitement (léger) au SO₂ pour limiter les réactions de Maillard dans les fruits secs et le blanchiment pour réduire les réactions enzymatiques dans les légumes secs (Bonazzi & Bimbenet, 2008). Des réactions biochimiques spécifiques sont recherchées, c'est le cas de la torréfaction du malt qui est un processus de séchage complet pour développer les couleurs et les arômes produits par la caramélisation.

I.7.2 Les transferts physiques

Il existe différents types, diminution de l'activité de l'eau, transition vitreuse, fusion des graisses, évaporation des composants volatils, migration ou rétention des composants volatils ou non volatils. Ces mouvements sont associés à des pertes et aux changements de température du matériau lors du séchage (Bonazzi & Bimbenet, 2008).

I.7.3 Les phénomènes mécaniques

Comme le croûtage, les fissures, la déformation, etc. qui ne peuvent être que partiellement réversibles par la réhydratation (Bonazzi & Bimbenet, 2008).

I.8. Méthodes de séchage

I.8.1 Séchage conventionnel

Le séchage à l'air classique ou à l'air chaud est l'une des opérations les plus fréquemment utilisées pour la déshydratation des aliments. Le dessèchement à l'air, en particulier, est un processus ancien usé pour conserver les aliments dans lesquels le solide à sécher est exposé à un flux d'air chaud qui coule en permanence et où l'humidité s'évapore. Le phénomène sous-jacent à ce processus est un problème complexe impliquant à la fois de la masse et de l'énergie. Le séchage à l'air offre des produits déshydratés pouvant avoir une durée de vie prolongée, mais malheureusement, la qualité d'un produit séché de manière conventionnelle est généralement bien réduite comparant à celle du produit alimentaire d'origine. L'air chauffé entre en contact avec les matériaux humides pour faciliter le transfert de chaleur et de masse. La convection est principalement impliquée.

Il faut spécifier le point de consigne de la température de l'étuve, le temps de séjour et la taille de l'échantillon qui n'est généralement pas critique, mais le temps de séjour dans l'étuve doit être adapté au rapport surface/volume. La masse finale constante restante est appelée la matière sèche, et la perte de masse (différence de poids avant et après séchage) donne la teneur en humidité initiale. L'humidité de l'air dans l'étuve peut augmenter du fait des vapeurs générées à

partir de l'échantillon séché, en fonction du renouvellement de l'atmosphère interne de l'étuve et de l'hétérogénéité de température dans l'étuve (prioriser la ventilation) (VASSEUR, 2009).

- **Avantages**

Les processus opérationnels sont simples, mais l'équipement est souvent simple et peu coûteux (Nguyen, 2015).

- **Inconvénients**

Cette opération peut facilement entraîner un rétrécissement important du produit (principalement au début de l'opération) et une perte importante de la qualité des éléments nutritifs (à la fin de l'opération, généralement en raison de temps de séchage longs) (Nguyen, 2015).

I.8.2 Séchage par micro-ondes

1) Définition

Le séchage par micro-onde est identique à celui du chauffage haute fréquence et se caractérise par l'absorption du rayonnement électromagnétique par la matrice chauffée (ROUSSY, ROCHAS, & OBERLIN, 2003). Le séchage aux micro-ondes des fruits et légumes est un moyen efficace de réduire le temps de séchage. Dans certains cas, cela contribue également à améliorer la qualité du produit. Les micro-ondes sont des ondes électromagnétiques qui se déplacent à vitesse de la lumière dans le vide. Ils se caractérisent par des fréquences comprises entre 300 MHz et 300 GHz, ou des longueurs d'onde comprises entre 1 m et 1 cm. Sur le spectre électromagnétique, ils se situent entre les radiofréquences et l'infrarouge. Quelle que soit l'application (domestique, médicale ou industrielle), la fréquence de contrôle est de 2,45 GHz pour éviter les risques d'interférences avec les communications radio et radar (Z. Li, Raghavan, Wang, & Vigneault, 2011).

C'est un procédé complexe de transfert de chaleur et de masse basé sur un chauffage volumétrique. La vapeur est générée dans les aliments et se propage à travers le gradient de pression. En raison de la forte pénétration des micro-ondes, l'intérieur et l'extérieur des aliments sont chauffés en même temps, augmentant la température des aliments en même temps. Le séchage par micro-ondes convertit l'énergie électromagnétique à haute fréquence en chaleur pour évaporer intensément l'humidité liquide et la transférer à la surface de la matière alimentaire. Deux étapes successives doivent être considérées dans ce procédé : l'évaporation et le séchage. Ce dernier comprend trois

étapes : le réchauffement, le séchage à vitesse stable et à vitesse de ralentissement de séchage (Guo, Sun, Cheng, Han, & Technology, 2017).

2) Composition

Tout système de chauffage par micro-ondes se compose de 03 éléments :

a) Générateur

Le magnétron fait partie du générateur qui convertit l'énergie électrique en énergie micro-ondes. Deux électrodes sont placées à l'intérieur du tube à vide et une différence de potentiel élevée est appliquée entre elles. Un électroaimant ou un aimant permanent crée un champ magnétique continu perpendiculaire au champ électrique appliqué entre les deux électrodes.

b) Guide d'onde

Il permet la transmission et le guidage des ondes émises par le magnétron. Il s'agit d'un tube métallique ou conducteur cylindrique dont la section est délimitée par des contours fermés pouvant contenir d'autres contours. Cette génératrice est choisie comme axe de propagation. Il existe deux types de diffusion : mode transverse magnétique (TM) et le mode transverse électrique (TE).

c) Applicateur

Est la cavité fermée qui assure la transmission de l'énergie électromagnétique du magnétron à la matière en cours de traitement. Il existe deux grandes catégories d'applicateurs, le monomode et le multimode (figure 8).

Un applicateur est dit monomode si sa géométrie est choisie pour qu'il n'existe qu'une seule configuration de champ à la fréquence de fonctionnement. L'énergie électromagnétique piégée se réfléchit sur les parois, créant des ondes stationnaires. Les applicateurs monomodes permettent un contrôle précis du champ électrique, mais sont réservés à de petites quantités de matière.

Un applicateur multimode est une cavité suffisamment grande pour accueillir plusieurs types de configurations de champ. Le champ électrique n'est pas aussi stable que dans les cavités monomodes et sa distribution varie. Ce type d'applicateur permet de traiter de grandes quantités de matière avec peu de variation des paramètres électriques et magnétiques.

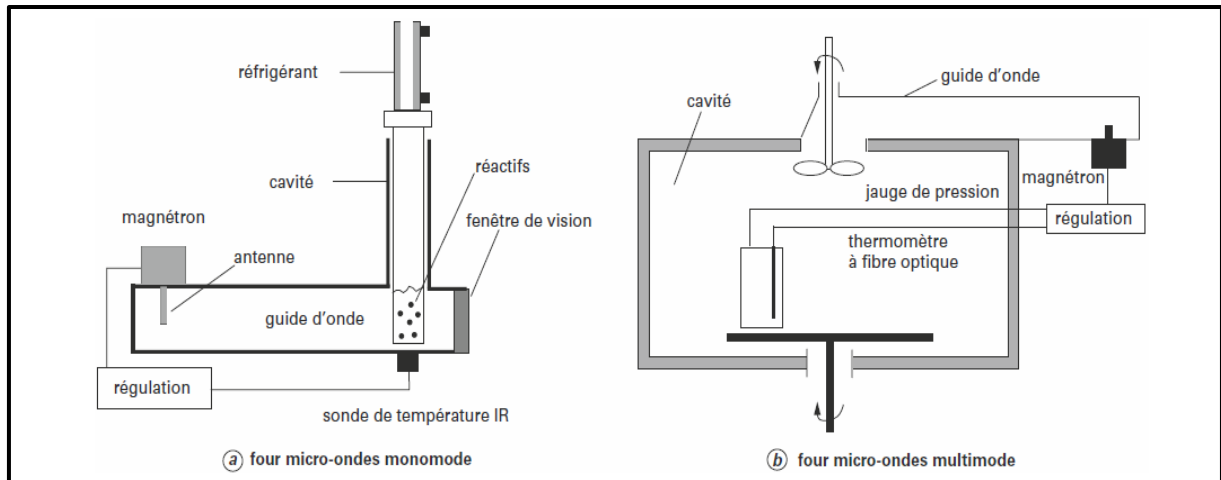


Figure 8. Schéma d'un four à micro-ondes monomode et multi mode (Perino & Chemat, 2015)

3) Principe et mécanisme du chauffage par micro-ondes

a) Interaction Onde -matière

Le mécanisme de chauffage diélectrique est basé sur le fait que les molécules polaires comme l'eau, sont des dipôles. En l'absence de champ électrique, les dipôles d'un milieu diélectrique sont orientés de manière aléatoire sous l'action du mouvement thermique du milieu. Sous l'action d'un champ électrique continu, les molécules ont tendance à s'orienter dans la direction du champ électrique. Plus le champ électrique est fort, moins le mouvement thermique a tendance à perturber l'alignement

Lorsque toutes les molécules sont alignées, un moment dipolaire global induit se produit. Sous l'influence d'un champ électrique alternatif de fréquence f , les dipôles tournent dans le sens du champ dans une alternance, perdent leur orientation lorsque le champ s'annule, et se réalignent dans le sens opposé pendant la seconde demi-alternance (la rotation dipolaire). La rotation du dipôle convertit l'énergie électrique en énergie cinétique. L'énergie cinétique est partiellement convertie en chaleur. L'alignement des dipôles sur un champ électrique est entravé par les forces d'interaction intermoléculaires (liaison hydrogène et forces de van der Waals).

Ces forces peuvent être comparées aux forces de frottement internes présentes dans les contacts solide-solide. Elles s'opposent donc à la libre rotation de la molécule. Le frottement qui se produit dégage de la chaleur. La dissipation d'énergie par le produit est maximisée lorsque la fréquence du champ électrique est égale à la fréquence de relaxation. Le phénomène de relaxation correspond à l'apparition d'un déphasage entre les oscillations du champ électrique et les oscillations dipolaires. Du fait de la fréquence micro-onde imposée, la chauffe du produit est maximisée et très efficace. Dans ce cas, la plupart des molécules exposées à l'action du

champ micro-ondes ne tournent pas avec le changement alternatif du champ, mais plutôt frissonne (Figure 9) (Perino & Chemat, 2015).

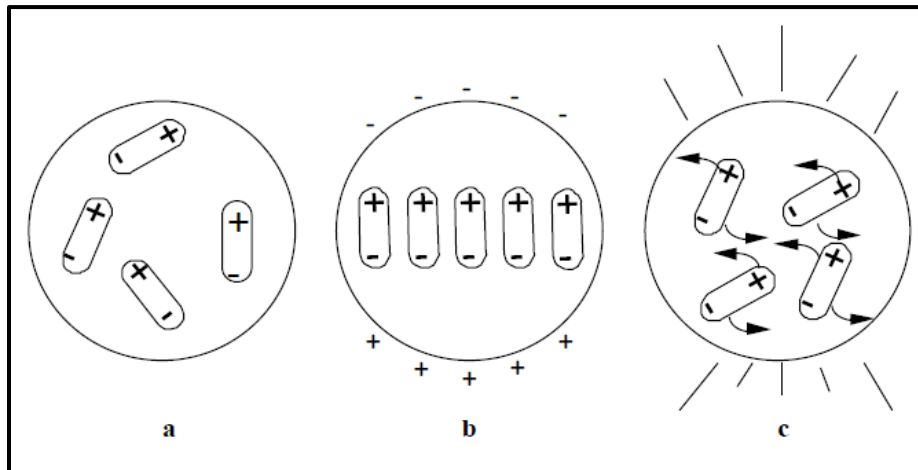


Figure 9. Distribution des dipôles sous l'effet dans un champ électrique.

a: absence de champ électrique ; b: sous champ électrique continu ; c: sous champ électrique alternatif (farhat , 2010).

b) Transfert de chaleur

Le transfert de chaleur du chauffage par micro-ondes est complètement opposé au chauffage conventionnel. Le transfert de chaleur conventionnel se fait de l'extérieur du récipient vers l'intérieur. Dans le chauffage par micro-ondes, le volume traité lui-même devient la source de chaleur. On parle de transfert de chaleur de l'intérieur du conteneur vers l'extérieur. Avec le chauffage par micro-ondes, la paroi extérieure du réacteur est plus froide que le centre du réacteur, à l'opposé avec le chauffage conventionnel utilisant des chemises, des plaques chauffantes et des flammes. C'est un mode de chauffage instantané sur le volume plutôt que sur la surface. Les phénomènes thermiques conducteurs et convectifs ne participent qu'en rôle secondaire dans l'équilibre de la température. Une surchauffe locale peut également se produire (La figure 10) (Lucchesi. E, 2005).

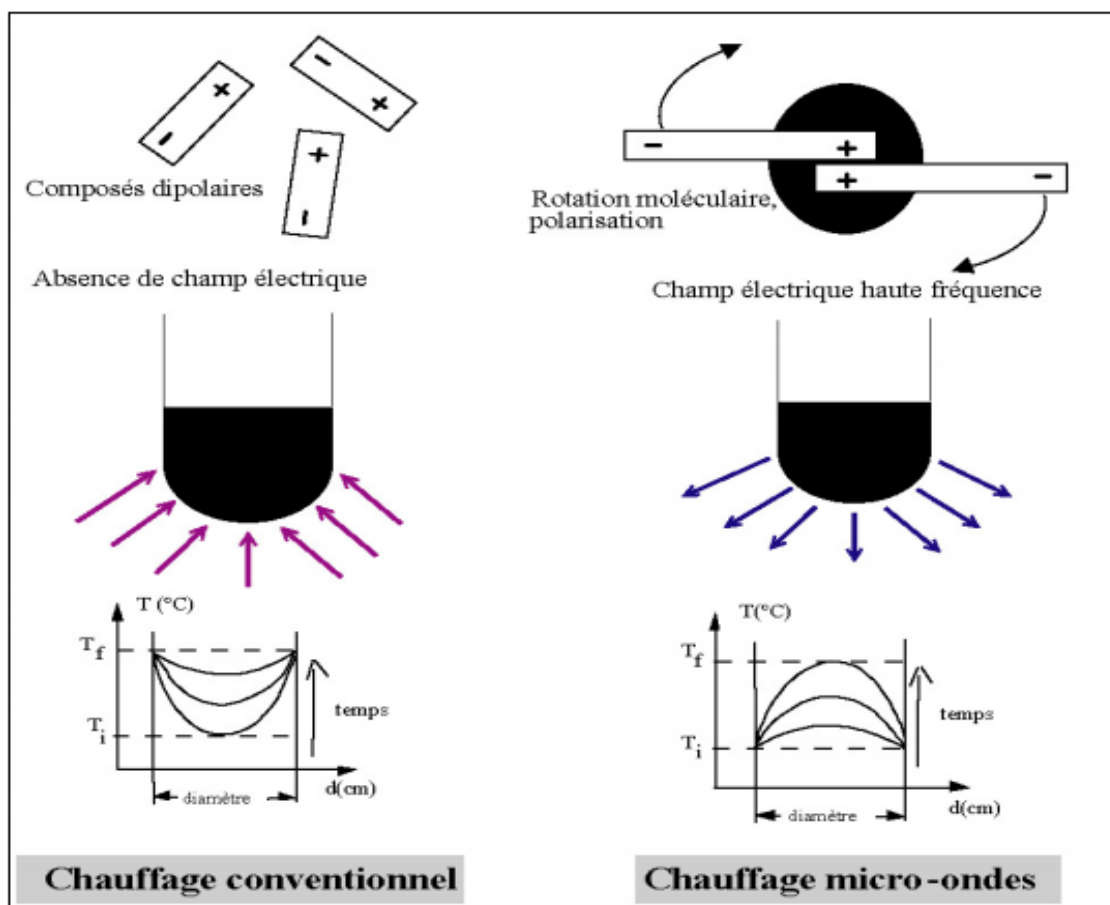


Figure 10. Transferts thermiques sous les deux modes de chauffage (Ferhat, 2007)

4) Applications des micro-ondes

L'application des micro-ondes est largement utilisée dans la science, l'industrie et la maison. De nombreux scientifiques ont rapporté les avantages de cette technique dans divers processus physiques, chimiques au niveau pilote ou industriel (Radoiu, 2020).

La qualité des aliments séchés dépend du mode de séchage utilisé, des conditions opératoires ainsi que de la nature et de la qualité de la matière première. Les conditions et la durée de stockage ont également un impact majeur. La qualité d'un aliment sec s'apprécie généralement par sa texture et sa capacité de réhydratation. Cependant, la dégradation des constituants chimiques, de couleur, de saveur et d'arôme doivent être soigneusement contrôlées pour garantir un impact minimal sur la qualité du produit (Kwok, Hu, Durance, & Kitts, 2004).

Souvent ces dégradations sont liées à une surchauffe et se limitent initialement à de simples changements de couleur du produit. Cependant, à des stades plus avancés, le goût, la capacité de réhydratation et les qualités sensorielles sont également affectés. En raison des couples temps-température de traitement, il est normal que le séchage ait un effet sur la valeur

nutritionnelle des aliments. Les dommages thermiques entraînent principalement une dégradation nutritionnelle et biochimique. Dans de nombreuses opérations, le niveau de température du produit au début de l'opération est clairement inférieur à celui de l'air lui-même en raison d'une forte évaporation. Ce n'est qu'aux étapes finales que se produit la dégradation thermique majeure. Dans le cas des micro-ondes, la dégradation thermique peut se produire dès le début du fonctionnement en raison du mode de chauffage, pour cela que la première étape de séchage est nettement plus avantageuse lorsqu'elle est réalisée à l'air chaud qu'aux micro-ondes. Ces effets sont plus prononcés en absence de régulation intrinsèque du chauffage par micro-ondes à cette étape (Kwok et al., 2004).

I.9. Notions de base

I.9.1 Activité de l'eau

Son concept a été introduit en 1952, lorsqu'il a été démontré que ce n'était pas la teneur en eau qui était en corrélation avec la croissance bactérienne dans les aliments, mais l'activité de l'eau, définie comme le rapport entre la pression de vapeur d'eau de l'aliment et la pression de vapeur d'eau pure dans les mêmes conditions. C'est une mesure sans dimension de l'eau libre dans un système alimentaire, disponible pour soutenir les réactions biologiques, physiques et chimiques (Figure 11). Elle est liée au concept de la pression de vapeur, pression exercée par une vapeur en équilibre à l'état solide ou liquide. Au cours de la déshydratation, la majeure partie de l'eau libre dans les aliments est chassée, après quoi la température est abaissée, supprimant l'apparition d'effets secondaires tels que l'oxydation lipidique et la croissance microbienne. La croissance bactérienne est inhibée à des niveaux d'activité de l'eau spécifiques, et les réglementations de la Food and Drug Administration (FDA) des États-Unis pour les aliments modérément humides sont basées sur ces niveaux. L'activité de l'eau est maintenant reconnue comme l'un des indicateurs de la qualité des aliments les plus importants (A A[†] Gowen, O'Sullivan, & O'Donnell, 2012).

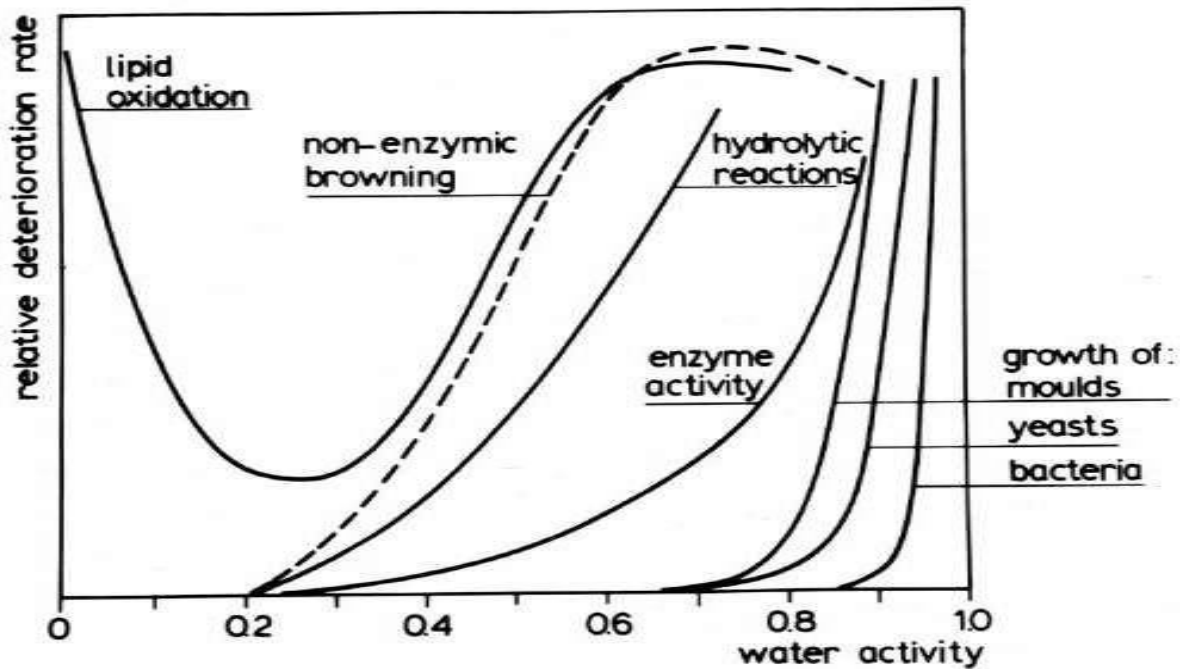


Figure 11. Diagramme de l'activité de l'eau et de la stabilité des aliments (Bonazzi & Dumoulin, 2011)

I.9.2 Teneur en humidité

La condition préalable de base pour le séchage, est la connaissance de l'état d'équilibre thermodynamique entre l'air ambiant et le solide, comme pour toute situation similaire de transfert de matière. La teneur en eau de la matrice lorsqu'il entre en équilibre avec l'air de séchage est une propriété utile incluse dans la plupart des modèles de séchage (A A[†] Gowen et al., 2012).

La quantité d'humidité (MC) dans un produit est désignée par rapport au poids de l'eau (c'est-à-dire sur la base sèche ou humide) (Saeed, Sopian, & Abidin, 2008).

Sur une base humide (%) (Saeed et al., 2008) :

$$MC_{wb}(\%) = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \cdot 100 \quad (1)$$

Et sur une base sèche (%), il peut être calculé comme suit (Sengar, Mohod, Khandetod, Shrirame, & Deshmukh, 2012) :

$$MC_{db}(\%) = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \cdot 100 \quad (2)$$

Les deux façons d'exprimer la teneur en eau sont liées par la relation suivante (Saeed et al., 2008):

$$MC_{db} (\%) = \frac{MC_{wb}}{100 - MC_{wb}} \quad (3)$$

Où :

MC_{db} : Teneur en eau sur base sèche

MC_{wb} : Teneur en eau sur base humide,

W_1 : Poids de l'échantillon avant séchage (g)

W_2 : Poids de l'échantillon séché (g).

I.9.3 Rapport d'humidité

Le rapport d'humidité (MR) est le rapport entre la teneur en eau à un moment donné et la teneur en eau initiale (Saeed et al., 2008). Il peut être calculé comme suit :

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (4)$$

Où :

MR : Taux d'humidité, à un instant t spécifique,

M_0 et M_e : Teneur en eau initiale et Teneur en eau à l'équilibre, respectivement.

I.9.4 Taux de séchage

Si un nouveau processus de séchage est utilisé, ou si un autre type d'aliment doit être séché, il faudra faire quelques essais pour déterminer le taux de séchage, qui pourra servir à déterminer combien de temps les aliments doivent rester dans le séchoir avant que la teneur en humidité ne baisse suffisamment pour empêcher l'altération microbienne. La vitesse de séchage a également un impact significatif sur la qualité des aliments et la consommation de carburant des aliments séchés (Mwale, Azam-Ali, & Massawe, 2007).

Le taux de séchage peut être exprimé comme suit :

$$DR = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (5)$$

Où :

DR : le taux de séchage (vitesse de séchage)

M_{t+dt} , M_t : les teneurs en humidité à $t+dt$ et t , respectivement

Dt : la différence de temps.

Le taux de séchage est affectée par de nombreux facteurs, notamment la configuration du séchoir, les conditions du procédé, les propriétés physico-chimiques et également la partie du végétal à sécher (de Holanda Rosanova, Maia, Freire, & do Carmo Ferreira, 2017).

I.10 Procédé de séchage en couche mince

Selon Inyang, Oboh, and Etuk (2018) le séchage en couche mince est considéré comme le séchage d'une couche de particules ou de tranches d'échantillon dans un approvisionnement abondant d'air de séchage aux caractéristiques physiques appropriées. Le séchage en couche mince est également décrit comme le procédé d'élimination de l'humidité d'un milieu poreux par évaporation dans lequel l'excès d'air de séchage est passé à travers une couche mince d'un matériau jusqu'à ce que la teneur en humidité d'équilibre soit atteinte (Aderibigbe et al., 2022; Inyang et al., 2018; Omid, Yadollahinia, & Rafiee, 2006).

II Cinétique de séchage

II.1 Définition

Compte tenu de la très grande diversité des produits alimentaires et biologiques, la meilleure façon de caractériser le comportement au séchage des produits est de mesurer expérimentalement sa cinétique. Pour les produits solides séchés par entraînement, l'approche de base consiste à placer le produit en question dans un flux d'air parfaitement contrôlé (humidité, température, vitesse) et à le peser à intervalles de temps réguliers pour enregistrer l'évolution de la masse au cours du temps (Bonazzi, Dumoulin, & Bimbenet, 2008).

La cinétique du séchage peut être exprimée par une courbe de séchage et une courbe de taux de séchage. La première représente les changements d'humidité en fonction du temps et la seconde reflète les changements du taux de séchage en fonction du temps (Cao et al., 2016). Les cinétiques de séchage d'un matériau sont les données les plus importantes requises pour la conception et la simulation des séchoirs. Elles représentent la facilité avec laquelle un produit se déshydrate dans des conditions de séchage spécifiques. Elle est affectée par les conditions externes du milieu et la structure physico-chimique de l'aliment. Dans le cas le plus général, on considère le séchage d'un aliment dans des conditions constantes afin d'obtenir la courbe de cinétique. Dans ces conditions, le milieu est en grand excès de sorte que ses propriétés peuvent être considérées comme constantes (Ratti, 2008).

II.2 Représentations graphiques

Les cinétiques du séchage sont généralement évoquées par une courbe de séchage, c'est-à-dire un tracé des variations de la teneur en humidité en fonction du temps (figure 11). Ce tracé peut être transformé en une courbe correspondante à la teneur en eau en fonction du temps (figure 12-A) ou à la vitesse de séchage (figure 12-B), ce qui permet une caractérisation claire du comportement du séchage du matériau (H. Sabarez, 2016; H. T. Sabarez, 2016).

II.2.1 Variation de la teneur en eau en fonction du temps

Lorsque des aliments sont placés dans un séchoir, il y a une courte période pendant laquelle la surface se réchauffe. Cette période est suivie de deux phases distinctes, le taux constant et le taux décroissant (Figure 12) (Azam-Ali, 2007). Pendant la première période de séchage, le solide entre dans le milieu chaud, subit un chauffage sensible jusqu'à la température où l'évaporation de la surface commence.

L'humidité du solide migre de l'intérieur assez rapidement pour maintenir la saturation de la surface. Cette étape est appelée période à taux constant, car la variation d'humidité par unité de

temps reste constante. À une teneur critique en humidité, la surface ne peut plus être maintenue saturée par la migration de l'humidité et la deuxième période de séchage commence. Au cours de cette phase, appelée période de taux décroissant, l'évaporation se produit à travers les pores du solide, la vapeur se diffusant vers la surface et la température de l'interface commence à augmenter. À ce stade, une résistance interne à la diffusion contrôle de plus en plus la vitesse du processus de séchage. Ce processus de séchage s'arrête lorsque le solide atteint l'équilibre entre la teneur en humidité et le milieu environnant (Jarque, Segarra, Cantavella, & Mondragón, 2015).

II.2.2 Variation de la vitesse de séchage en fonction du temps

La figure 12-B montre un tracé typique de la courbe de la vitesse de séchage en fonction du temps, obtenu par différentiation numérique des données de la courbe de séchage. La figure signale que pendant le séchage le taux d'élimination de l'humidité présente des caractéristiques distinctes. La tendance suit un modèle dans lequel au début du processus de séchage il y a une augmentation initiale rapide de la vitesse de séchage au fur et à mesure que l'équilibre se produit. Ce processus est suivi de deux périodes distinctes, à savoir une stabilisation progressive (période de taux constant), suivie d'un déclin (période de taux décroissant) (H. T. Sabarez, 2016).

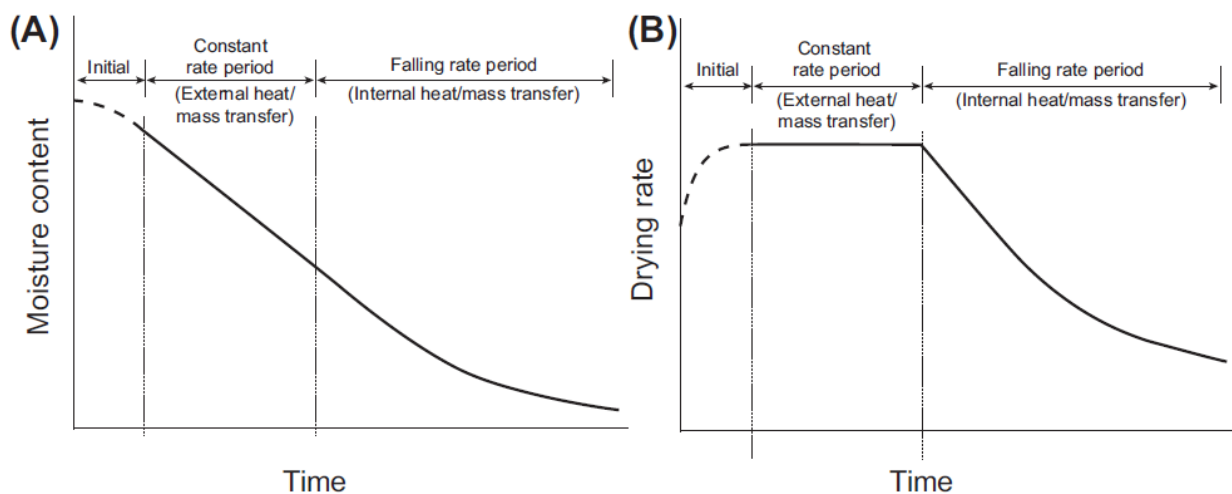


Figure 12. Graphiques typiques de la cinétique du séchage : (A) courbe de séchage ; (B) courbe de vitesse de séchage (H. T. Sabarez, 2016).

II.2.3 Variation du taux de séchage en fonction de la teneur en eau

Les informations obtenues des expériences de taux de séchage peuvent être représentées d'une autre manière plus utile en traçant la teneur en humidité en fonction de la variation de l'humidité dans le temps (taux de séchage) au fil du temps. On obtient ainsi un type de graphique illustré à la figure 13 (Azam-Ali, 2007).

Ce dernier donne deux informations importantes :

- Le taux réel de séchage pendant la période du taux constant, qui informe sur l'efficacité du séchoir
- Le taux d'humidité final de l'aliment séché qui indique si celui-ci sera stable pendant le stockage (Azam-Ali, 2007).

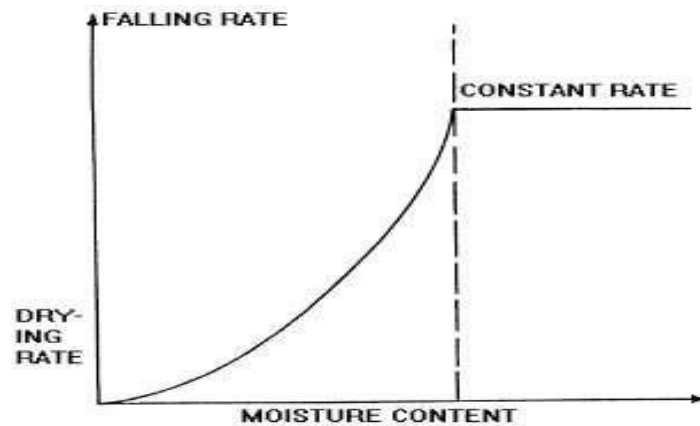


Figure 13. Représentation graphique de la variation du taux de séchage en fonction de la teneur en eau (Azam-Ali, 2007).

II.3 Facteurs affectants la cinétique du séchage

Diverses conditions affectent le séchage, qui sont la température de séchage, la vitesse de l'air, la taille et la forme du matériau et l'humidité relative. La température de séchage et l'épaisseur de la matrice ont le plus grand impact sur le séchage des fruits et légumes (Daniel I. Onwude, Norhashila Hashim, Rimfiel B. Janius, Nazmi Mat Nawi, & Khalina Abdan, 2016). De toute évidence, les matrices les plus petites (plus minces) sèchent plus rapidement, car la distance que les molécules d'eau dans la matrice alimentaire doivent parcourir pour atteindre la surface est réduite (H. T. Sabarez, 2016). À ces facteurs, s'ajoute d'autres paramètres tels que la teneur en humidité finale, le rétrécissement du produit et les caractéristiques qui sont liées à la conservation et à la qualité de l'aliment comme paramètres les plus influençant (Inyang et al., 2018).

II.3.1 T empérature de l'air

La température de l'air de séchage a une grande influence sur la vitesse de séchage. Cet effet est dû à l'apport de chaleur dans le produit qui augmente avec la température de l'air. Cependant, la température du matériau est encore plus importante que la température élevée de l'air. Par conséquent, la conductivité de l'eau dans le matériau devient importante.

II.3.2 V itesse de l'air

La vitesse de l'air influence la cinétique de séchage particulièrement au début du procédé. Toutefois, pour les matériaux dont la cinétique est contrôlée par le transfert interne de l'eau, l'effet de la vitesse de séchage de l'air est beaucoup plus faible.

II.3.3 H umidité de l'air

La teneur en humidité de l'air joue un rôle primordial dans le comportement de la vitesse de séchage d'un produit particulier. Cet effet semble être important au début du procédé de déshydratation et diminue avec l'augmentation de la température.

III. Modélisation mathématique

III.1 Définition

La modélisation mathématique des procédés et équipements de séchage est un aspect important de la technologie du séchage dans le traitement post-récolte des matières agricoles. On trouve dans la littérature de nombreuses équations mathématiques qui décrivent les phénomènes de séchage des produits agricoles. Parmi eux, les modèles en couche mince ont trouvé une large application en raison de leur facilité d'utilisation (Harish, Rashmi, Krishna Murthy, Blessy, & Ananda, 2014). Ces modèles sont créés pour décrire et suivre l'histoire du produit pendant le séchage, en utilisant des paramètres comme la température, le temps, la teneur en humidité et l'indice de qualité (Bonazzi & Dumoulin, 2011b).

III.2 Intérêt de la modélisation

La modélisation des processus de séchage présente de multiples intérêts :

- Permettre aux ingénieurs de choisir la technique de séchage la plus adaptée pour un produit donné ainsi que de choisir les conditions de fonctionnement adéquates (Khazaei & Daneshmandi, 2007) ;
- L'expérimentation à grande échelle pour différents produits et la configuration de systèmes est parfois coûteuse et impossible. Ainsi, la prédiction de la cinétique de séchage de matrices spécifiques dans diverses conditions est très utile pour la conception et l'optimisation des séchoirs (Khazaei & Daneshmandi, 2007) ;
- L'utilisation d'un modèle de simulation est un outil précieux pour prédire la performance des systèmes de séchage (Khazaei & Daneshmandi, 2007) ;
- La modélisation mathématique est une étape importante pour la mise à l'échelle, la conception et le contrôle du processus (Sledz, Wiktor, Rybak, Nowacka, & Witrowa-Rajchert, 2016) ;
- Une équation mathématique correctement choisie permet de connaître la cinétique du processus en fonction de ses paramètres (Sledz et al., 2016) ;
- La modélisation mathématique donne des informations nécessaires sur la relation entre la température de l'air et la vitesse de séchage et le taux d'évaporation de l'eau à travers le tissu végétal (Amanlou, Tavakoli Hashjin, Ghobadian, & Najafi, 2015) ;
- Les modèles de séchage sont utilisés pour estimer la teneur en humidité à tout moment pendant de séchage (Amanlou, Tavakoli Hashjin, et al., 2015).

III.3 Classification des modèles mathématiques

Les modèles de séchage en couche mince qui décrivent le phénomène de séchage des matrices végétales se répartissent principalement en trois catégories, à savoir théorique, semi-théorique et empirique (Akpınar, 2006; Panchariya, Popovic, & Sharma, 2002). La différence majeure entre ces groupes est que le premier ne prend en compte que la résistance interne au transfert d'humidité tandis que les deux autres ne prennent en compte que la résistance externe au transfert d'humidité entre le produit et l'air (Babalıs, Papanicolaou, Kyriakis, & Belessiotis, 2006; Panchariya et al., 2002).

III.3.1 Modèles théoriques

Les modèles théoriques les plus utilisés sont dérivés de la deuxième loi de diffusion de Fick (Erbay & İcier, 2010). Ils font intervenir la géométrie du matériau, sa diffusivité massique et sa conductivité (Daniel I Onwude et al., 2016) et sont donc inadéquats et ont tendance à générer des résultats erronés et complexes pour les applications pratiques. Les modèles théoriques proposent trop d'hypothèses, entraînant à un nombre important d'erreurs (Inyang et al., 2018).

III.3.2 Modèles semi-théoriques

Les modèles semi-théoriques sont généralement provenus de solutions en série générales simplifiées de la deuxième loi de Fick ou de la modification de modèles simplifiés et sont valables dans la plage de température, de vitesse d'écoulement de l'air, d'humidité relative et de teneur en humidité pour laquelle ils ont été développés. Ces modèles nécessitent peu de temps par rapport aux modèles théoriques en couche mince et ne nécessitent pas d'hypothèses sur la géométrie d'un aliment typique, sa diffusivité de masse et sa conductivité (Panchariya et al., 2002). Ces modèles ont été développés pour faciliter leur utilisation et pour s'adapter aux données de séchage de la matière alimentaire à sécher. Une grande importance a été accordée au développement de modèles semi théoriques pour atteindre l'harmonie entre la théorie et la facilité d'utilisation (Inyang et al., 2018).

III.3.3 Modèles empiriques

Les méthodes empiriques sont des méthodes basées sur des données expérimentales et une analyse sans dimension. Les modèles de séchage empiriques montrent une relation directe entre la teneur moyenne en humidité et le temps de séchage. Étant donné que cette méthode omet les bases du processus de séchage et que ses paramètres n'ont aucune signification physique, elle ne fournit donc pas une vision précise des processus importants qui se produisent au cours du

phénomène tout en décrivant les courbes de séchage pour certaines conditions expérimentales (Coradi, Melo, & Rocha, 2014). Ces modèles empiriques possèdent également des propriétés similaires à ceux des modèles semi-théoriques dépendent fortement des conditions expérimentales et ne fournissent que des informations limitées sur le comportement de séchage du produit (Erbay & Icier, 2010). En raison de la complexité de la diffusion de l'humidité dans les produits alimentaires et agricoles, les modèles empiriques sont encore largement utilisés pour décrire les caractéristiques de séchage de certaines matrices (Fernando & Amarasinghe, 2016).

III.4 Statistiques sur la qualité de l'ajustement des modèles

La modélisation du comportement de séchage de différents produits agricoles fait souvent appel aux méthodes statistiques d'analyse de régression et de corrélation. Les modèles de régression linéaires et non linéaires sont des outils importants pour trouver la relation entre les différentes variables (Kavak Akpınar, Bicer, & Cetinkaya, 2006). Les équations de séchage en couche mince nécessitent une variation du taux d'humidité (MR) en fonction du temps (t) (Erbay & Icier, 2010). Ces modèles sont évalués et comparés à l'aide de mesures statistiques (Saeed et al., 2008). Certaines de ces mesures sont décrites dans le tableau III.

Le modèle ayant la valeur la plus élevée pour le coefficient de corrélation (r) ou le coefficient de détermination (R^2) sera sélectionné pour décrire les courbes de séchage lorsqu'ils sont utilisés comme mesures statistiques et l'inverse est le cas pour les autres mesures statistiques (Inyang et al., 2018).

Tableau III. Diverses mesures statistiques utilisées pour évaluer l'ajustement du modèle (Inyang et al., 2018).

Mesures statistiques	Formule
Erreur quadratique moyenne	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N}}$
Erreur moyenne de biais	$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})$
Chi carré (Chi carré réduit)	$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - z}$
Moyenne Écart relatif Modulus	$P (\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^n \left \frac{MR_{Qi} - MR_{ei}}{MR_{ei}} \right $
Coefficient de Détermination	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,ii} - MR_{pre,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}$
Erreur quadratique totale	$SSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2$
Efficacité de la modélisation	$EF = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{i,exp} - MR_{i,exp \text{ mean}})^2 - \sum_{i=1}^N (MR_{i,pre} - MR_{i,exp})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{i,exp} - MR_{i,exp \text{ mean}})^2}$
Coefficient de corrélation	$r = \frac{N \sum_{i=1}^N MR_{pre,i} MR_{exp,i} - \sum_{i=1}^N MR_{pre,i} \sum_{i=1}^N MR_{exp,i}}{\sqrt{(N \sum_{i=1}^N MR_{pre,i}^2 - (\sum_{i=1}^N MR_{pre,i})^2) (N \sum_{i=1}^N MR_{exp,i}^2 - (\sum_{i=1}^N MR_{exp,i})^2)}}$
Moyenne Écart relatif	$E (\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left \frac{\text{Experimental value} - \text{Predicted value}}{\text{Experimental value}} \right $
Somme résiduelle des carrés	$RSS = \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2$

III.4 Notion de constante de séchage, de diffusivité effective de l'humidité et d'énergie d'activation

III.4.1 Constante de séchage

a) Définition

Dans le concept de séchage en couche fine, la constante de séchage est la combinaison des propriétés de transport du séchage telles que la diffusivité de l'humidité, la conductivité thermique, la chaleur spécifique, la chaleur d'interface, la densité et les coefficients de masse. Ainsi, la connaissance des propriétés de transport et des matériaux est nécessaire pour appliquer toute équation de transport (Inyang et al., 2018).

b) Facteurs affectant la constante de séchage

La constante de séchage dépend à la fois des propriétés du matériau et de l'air car il s'agit d'une propriété phénoménologique représentative de plusieurs phénomènes de transport. Ainsi, elle est fonction de la température et de l'épaisseur du matériau, la teneur en humidité, ainsi que de la température et de la vitesse de séchage (Marinos-Kouris & Maroulis, 2006).

III.4.2 Diffusion effective de l'humidité**a) Définition**

La diffusion est une transformation par laquelle la masse est transportée d'une partie d'un système à une autre partie en raison d'un gradient de concentration. Ce processus conduit à un équilibre de la concentration au sein du système. La diffusion dans les liquides et les solides est un mécanisme important de transport de masse dans de nombreux processus chimiques et biologiques (Srikiatden & Roberts, 2007). Pendant le séchage, la diffusion dans les solides est un processus complexe qui peut impliquer une diffusion moléculaire, un flux capillaire, un flux de Knudsen, un flux hydrodynamique ou une diffusion de surface. Si l'on combine tous ces phénomènes en un seul, la diffusivité effective peut être définie à partir de la deuxième loi de Fick (Marinos-Kouris & Maroulis, 2006).

La diffusivité effective de l'humidité (D_{eff}) est un indice important dans la modélisation, la conception et l'optimisation d'un processus de séchage. Sa valeur détermine le taux de transfert de masse du produit dans un processus de séchage et il est considéré comme le paramètre clé du séchage qui représente le terme conducteur de tous les mécanismes de transfert d'humidité (Amiri Chayjan, Kaveh, & Khayati, 2015).

b) Facteurs affectant la diffusion effective de l'humidité

Elle est généralement utilisée en raison des informations limitées sur le mécanisme de transfert d'humidité pendant le séchage et de la complexité du processus. Ce dernier est affecté par la composition, la teneur en humidité, la température et la porosité du matériau (Elcin Demirhan & Özbek, 2011).

c) Calculs de la diffusivité effective de l'humidité

La migration de l'humidité implique un certain nombre de phénomènes de transport, tels que le mouvement capillaire, la diffusion moléculaire, la diffusion de liquide, la diffusion de vapeur et l'écoulement de Knudsen (A. A. Gowen, Abu-Ghannam, Frias, & Oliveira, 2008). Tous ces

phénomènes sont combinés en un seul terme appelé diffusivité effective de l'humidité (équation 6) (Erbay & Icier, 2010)

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_0 - M_e)} = A_1 \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{A_2} t\right) \quad (6)$$

Où : A_1 et A_2 sont des constantes géométriques qui varient en fonction de la géométrie du produit (Tableau IV).

Tableau IV. Valeurs des constantes géométriques en fonction de la géométrie du produit (Erbay & Icier, 2010)

Géométrie du produit	A_1	A_2^*
Couche mince	$8/\pi^2$	$4L^2$
Sphère	$6/\pi^2$	$4r^2$
Couche mince à 3 dimensions	$(8/\pi^2)^3$	$1/(L_1^2 + L_2^2 + L_3^2)$

* L : la demi-épaisseur de la tranche si le séchage se fait des deux côtés, ou L est l'épaisseur de la tranche si le séchage se fait d'un seul côté.

III.4.3 Énergie d'activation

a) Définition

L'énergie d'activation est un autre paramètre de séchage important qui représente le degré d'énergie des molécules d'eau pour la diffusion et l'évaporation de l'humidité (Amiri Chayjan et al., 2015). Elle peut être définie comme l'énergie minimale requise pour démarrer la diffusion de l'humidité à partir des produits alimentaires (Olawoye, Kadiri, Babalola, & Yildiz, 2017).

b) Calculs de l'énergie d'activation

Il a été démontré que la dépendance de la température de la diffusivité effective suivait une Relation d'Arrhenius (équation 7) (Bhattacharya, Srivastav, & Mishra, 2015).

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (7)$$

Où :

D_{eff} : Diffusivité effective (m^2/s) est le facteur pré-exponentiel (m^2/s)

R : Constante universelle des gaz (8,314 kJ/mol K)

T : Température (K)

E_a : Energie d'activation (kJ/mol).

L'énergie d'activation pendant le séchage par convection peut donc être calculée à l'aide d'une exponentielle basée sur l'équation 7 (L. Ben Haj Said, H. Najjaa, A. Farhat, M. Neffati, & S. Bellagha, 2015).

Cependant, dans le cas du séchage aux micro-ondes, comme la température n'est pas une variable mesurable, l'équation d'Arrhenius peut être utilisée sous une forme modifiée pour illustrer la relation entre le rapport entre la puissance de sortie des micro-ondes, la constante de vitesse cinétique et la quantité d'échantillon, au lieu de la température pour le calcul de l'énergie d'activation (équation 8) (Ilknur Alibas & Kacar, 2016).

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a m}{P}\right) \quad (8)$$

Où :

D_{eff} : Diffusivité effective (m²/s),

D_0 : Facteur pré-exponentiel (m²/s)

m : Poids de l'échantillon brut (g)

P : Puissance des micro-ondes (W)

E_a : Energie d'activation (W/g).

PARTIE EXPERIMENTALE

PARTIE A :

CINÉTIQUE DE SÉCHAGE ET

MODÉLISATION

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Partie Expérimentale**Partie A : Cinétique de séchage et modélisation****Matériel et Méthodes****I. Matériel végétal****Description de la variété**

L'orange sanguine (*Citrus sinensis* [L.] Osbeck) variété Moro ; localement appelée Portugaise, est l'une des variétés d'orange sanguine provenant des îles de Malte et de Sicile. Elles sont cultivées, depuis plusieurs siècles, dans la région méditerranéenne (Kelebek, Canbas, & Selli, 2008).

Collecte

Cet œuvre porte sur l'étude de l'une des variétés généralement utilisées dans l'industrie de la boisson et de jus, L'orange sanguine Moro (*Citrus sinensis* [L.] Osbeck) ; dont la partie étudiée est toute l'orange (l'écorce et la pulpe) ; était exempte d'altération (fongiques, bactériennes), ou de détérioration (mécanique, insecte, animaux). Le matériel végétal est récolté en mois d'Avril au niveau d'un verger agrumicole localisé dans la commune d'Oued Ghir wilaya de Bejaia (Figure 14).



Figure 14. Photographie de l'orangé et du fruit (orange sanguine Moro).

Les échantillons de fruits ont été lavés à l'eau courante puis à l'eau distillée et stockés à basse température avant d'être soumis au processus de séchage par étuve et micro-ondes à différentes températures et puissances. Ensuite, on les a laissées atteindre la température ambiante (24 ± 1 °C) pendant environ une heure avant de commencer le travail. L'orange est coupée en tranches fines ; l'épaisseur moyenne était de $7,50 \pm 0,12$ mm est mesurée avec un pied à coulisse.

II. Méthodes

II. 1 Equipements et procédure de séchage

II.1.1 Séchage par convection

Le séchage conventionnel par convection a été réalisé à l'aide d'une étuve ventilée (Memmert, Allemagne) (Figure 15-a) à différentes températures : 40, 60, 80, 100 et 120 °C. Pendant les essais de séchage, chaque échantillon des expériences de séchage en couche mince constitué de tranches d'orange sanguine a été placé sur assiette en verre, et placé à l'intérieur de l'étuve. La perte d'humidité a été mesurée par pesée sur la balance numérique avec une précision de 0,01 g (RADWAG, WPS 600/C/2, Pologne). Le processus de séchage a été poursuivi jusqu'à ce que le poids de l'échantillon atteigne un poids constant correspondant à un niveau d'humidité. Toutes les pesées ont été effectuées en triplicata.

II.1.2 Séchage par micro-ondes

Le traitement de séchage a été réalisé dans un micro-onde numérique domestique (LG MH6336GIH, China) (figure 15-b) dont ses caractéristiques techniques : 230 V, une fréquence de 2450 MHz à des puissances de sortie des micro-ondes réglables, soit 200, 400, 600, 800 et 1000 W.

La taille de l'espace interne du micro-onde était de 476 (H) × 272 (L) × 388 (P) mm, et consistait en une plaque de verre rotative de 300 mm de diamètre à la base du four. Le niveau de puissance de sortie et la durée du traitement par micro-ondes étaient déterminés par le contrôle numérique.

Pendant les essais de séchage, chaque échantillon des expériences de séchage en couche mince a été placé au centre du micro-onde.

La perte d'humidité a été mesurée périodiquement par pesée sur une balance numérique. Trois répétitions de chaque expérience ont été effectuées, et les données indiquées sont une moyenne de ces résultats. Le processus de séchage a été poursuivi jusqu'à ce que le poids de l'échantillon atteigne un poids constant correspondant à un niveau d'humidité.



Figure 15. Images de l'étuve ventilée (a) et du microonde (b) utilisés lors des expériences de séchage.

II.2 Taux d'humidité et matière sèche

Le taux d'humidité du fruit frais a été déterminée par dessèchement à l'étuve, 50 g de l'orange Moro *Citrus sinensis [L.] Osbeck* ont été porté à 103 ± 2 °C pendant 03 heures ensuite par des cycles de 30 minutes jusqu'à poids stable. Les pourcentages en humidité sont calculés selon la formule suivante (Nobel et al., 1991) :

$$TH \% = (P_f - P_s / P_f - P_c) * 100$$

Où :

TH (%) : Taux d'humidité en pourcentage.

P_c : Poids du creuset vide (g).

P_f : Poids du creuset avec l'échantillon avant le Séchage (g).

P_s : Poids du creuset avec l'échantillon séché (g).

Le pourcentage en matière sèche (MS) est obtenu comme suit :

$$MS \% = 100 - TH \%$$

II.3 Représentations de la cinétique de séchage

Les résultats du suivi de la cinétique du séchage par les procédés convectif et micro-ondes ont été représentés sous trois formes cinétiques en traçant les graphiques de :

II.3.1 Evolution du taux d'humidité en fonction du temps

Le tracé de ce graphique nécessite le calcul des valeurs du taux d'humidité (MR) qui varient en fonction du temps de séchage (t). Les valeurs MR sont calculées selon la formule de l'équation 9, qui est la formule simplifiée de l'équation 7, puisque M_e est supposée négligeable par de

nombreux auteurs (Amanlou, Hashjin, Ghobadian, & Najafi, 2015; Hosain Darvishi et al., 2016; Naderinezhad, Etesami, Poormalek Najafabady, & Ghasemi Falavarjani, 2016).

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (9)$$

Où :

MR : Rapport d'humidité,

M_t : Teneur en humidité à un moment spécifique (t)

M_0 : Teneur en eau initiale.

II.3.2 Evolution de la vitesse de séchage en fonction du temps

Ce graphique consiste à tracer la variation des valeurs de la vitesse de séchage (DR) en fonction du temps (t). Les valeurs de DR sont calculées selon la formule de l'équation 8.

II.3.3 Evolution de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau

Ce graphique consiste à tracer la variation des valeurs de la vitesse de séchage en fonction de la variation de la teneur en humidité de l'échantillon à sécher. Le taux de séchage (DR) est calculé selon la formule suivante selon la formule de l'équation 8 et la teneur en humidité (MC_{db}) est calculée selon la formule de l'équation 10.

$$MC_{db} = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \quad (10)$$

Où :

MC_{db} : Teneur en eau en base sèche (Kg d'eau/Kg dm)

W_1 : Poids de l'échantillon avant séchage (g)

W_2 : Poids de l'échantillon séché (g).

II.4 Détermination de la teneur en eau et des activités de l'eau

Les tranches d'orange sanguine séchées ont été broyées à l'aide d'un broyeur domestique pour produire des poudres à fines particules, qui sont ensuite stockées dans des flacons ambrés pour une utilisation ultérieure

II.4.1 Teneur en eau

La teneur en humidité des poudres obtenues après séchage convectif et micro-ondes a été déterminée selon le même protocole appliqué à la matrice fraîche avec une légère modification (un échantillon test de 1g).

II.4.2 Activité de l'eau (a_w)

L' a_w a été mesurée en trois exemplaires à l'aide d'un a_w mètre AquaLab DewPoint (Decagon Devices Inc., États-Unis). Les résultats ont été exprimés en moyenne.

II.5 Analyse statistique

Toutes les expériences ont été menées en triplicata et les données expérimentales ont été exprimées en moyennes \pm l'écart-type. L'analyse statistique a été réalisée par l'analyse de variance (test ANOVA univarié) en utilisant le logiciel JMP Pro 13. La signification des différences entre les moyennes est déterminée par le test de Tukey à $p \leq 0,05$.

III. Modélisation mathématique des courbes de séchage

Cette partie consistant en la modélisation des cinétiques de séchage des tranches d'oranges sanguines est une partie complémentaire à la précédente.

Pour la modélisation, seules les données cinétiques concernant la variation du MR en fonction du temps ont été utilisées. Nous illustrons donc dans les titres qui suivent les équations utilisées à cet effet.

Divers modèles mathématiques ont été rapportés afin d'étudier la modélisation des cinétiques en couche mince. Dans cette étude, trente-huit (38) expressions différentes ont été examinées (Tableau V). Ces modèles estiment que les courbes de séchage répondent à une équation du (MR) en fonction du temps (t). Le taux d'humidité sans dimension (MR) a été calculé à l'aide de l'équation 7.

Tableau V. Modèles mathématiques de courbes de séchage cités par divers auteurs

Nom du modèle empirique	Equation Mathématique
1 Ademiluyi Modified	$MR = a \exp(-kt)^n$
2 Aghabashlo Model	$MR = \exp[-(-kt^n) + bt] + c$
3 Alibas	$MR = a \exp(-k_1 t$
4 Balbay and sahin	$MR = (1-a) \exp(-kt^n) + b$
5 Binomial	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(k_1 x_1)$
6 Chavez-Mendez et al.,	$MR = (1 - (1 - L_2) L_1 t)^{1/(1-L_2)}$
7 Combined Two Term and Page	$MR = a \exp(-kt^n) + b \exp(-ht^n)$
8 Demir et al.	$MR = a \exp(-kt)^n + b$
9 Diffusion approach	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$
10 Fernando and Amarasinghe	$MR = (1 + at + bt^2) / (1 + ct)$
11 Geometric	$MR = at^{(-n)}$
12 Hasibuan and Daud	$MR = 1 - at^n \exp(-kt^n)$
13 Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
14 Hii et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + c \exp(-k_1 t^n)$
15 Hustrulid and Flikke	$MR = a \exp(-kt)$
16 Lewis	$MR = \exp(-kt)$
17 Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
18 Logistic	$MR = b / (1 + a \exp(kt))$
19 Midilli and Kucuk	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
20 Modified Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-k_1 t) + c \exp(-K_2 t)$
21 Modified Midilli	$MR = \exp(-kt) + bt$
22 Modified Page I	$MR = \exp(-kt)^n$
23 Modified Page II	$MR = \exp(-c(t/L^2)^n)$
24 Modified Page III	$MR = k \exp(-t/d^2)^n$
25 Newton	$MR = \exp(-kt)$
26 Page	$MR = \exp(-kt^n)$
27 Parabolic	$MR = c + bt + at^2$
28 Silva et al.	$MR = \exp(-at - bt^{1/2})^{1/2}$
29 Simplified Fick's diffusion equation	$MR = a \cdot \exp(-k(t/L^2))$
30 Singh et al.	$MR = \exp(-kt) - akt$
31 Sledz et al.	$MR = b \exp(-kt) / (1 + a \exp(k_1 t))$
32 Taghian Dinani et al.	$MR = a \exp(-((t-b)/a)^2)$
33 Two terms	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-k_1 t)$
34 Two terms exponential	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$
35 Vega Lemus	$MR = (a + kt)^2$
36 Verma et al.	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-k_1 t)$
37 Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
38 Weibull	$MR = \exp(-(t/a)^b)$

Note : k, k₁, k₂ – les coefficients de séchage (1/min) ; a, b, c, L₁, L₂ – les coefficients des Equations ; n – exposant ; t– temps (min); L – moitié de l'épaisseur (m).

IV. Diffusion effective de l'humidité

L'un des paramètres les plus importants de la cinétique du séchage est la diffusivité effective (D_{eff}), qui décrit le transport d'humidité interne du matériau vers l'environnement pendant la période de chute des taux (Aral & Beşe, 2016; Motevali, Minaei, Banakar, Ghobadian, & Darvishi, 2016; Murthy & Manohar, 2014). Dans ce but, la deuxième équation simplifiée de Fick pour la diffusion a été utilisée pour estimer la diffusivité effective de l'humidité (D_{eff}) des tranches de *Citrus sinensis* [L.] Osbeck pendant leur séchage.

Cependant, certains auteurs, tels que Özbek and Dadali (2007) et Elcin Demirhan and Özbek (2011), ont supposé dans leurs études que le matériel végétal était une dalle car l'épaisseur de l'échantillon était bien inférieure à son diamètre et ont indiqué que les hypothèses suivantes ont été faites pour le corps en forme de dalle :

- L'humidité est initialement répartie uniformément dans la masse d'un échantillon.
- Le transfert de masse est symétrique par rapport au centre.
- L'humidité de surface de l'échantillon atteint instantanément l'équilibre avec l'état de l'air ambiant.
- La résistance au transfert de masse à la surface est négligeable par rapport à la résistance interne de l'échantillon.
- Le transfert de masse est représenté par un mécanisme de diffusion.
- Le coefficient de diffusion est constant et le rétrécissement est négligeable.

Dans ce cas, la diffusivité effective de l'humidité peut être calculée par l'équation 11 :

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} e^{\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}} \quad (11)$$

Où :

D_{eff} : Diffusivité effective de l'humidité (m^2/s),

L : Demi-épaisseur (séchage des deux côtés) des tranches d'orange sanguine ($L=0,0002$ m),

n : Nombre entier positif (nombre d'expérience)

t : Temps de séchage (s).

Pour un séchage prolongé, l'équation susmentionnée peut être simplifiée au premier terme de la série (lorsque $n=0$) et l'équation 12 peut être exprimée sous une forme logarithmique comme l'équation 13 en prenant le logarithme naturel des deux côtés (Naidu et al., 2016; Zhang, Song, Wang, Zhao, & Fan, 2016):

$$\ln(MR) = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \quad (12)$$

Ceci est évalué numériquement pour le nombre de Fourier, $F_0 = D_{eff} t / 4L^2$ (Hosain Darvishi, Asl, et al., 2014). À cette fin, l'équation 13 peut être réécrite comme suit :

$$\ln(MR) = \ln \frac{8}{\pi^2} - \pi^2 F_0 \quad (13)$$

Ainsi :

$$F_0 = -0.101 \ln(MR) - 0.0213 \quad (14)$$

La diffusivité effective de l'humidité a été calculée par l'équation 15 :

$$D_{eff} = \frac{F_0}{\left(\frac{t}{4L^2}\right)} = \frac{-0.101 \ln(MR) - 0.0213}{\left(\frac{t}{4L^2}\right)} \quad (15)$$

V. Énergie d'activation

Cette énergie est souvent décrite en utilisant une simple relation exponentielle d'Arrhenius pour étudier l'effet de la température. A cet effet, dans le cas du séchage à l'air chaud : deux équations ont été utilisées (Equations 16 et 17). L'équation 16 relie la température à la diffusivité effective de l'humidité (Leila Ben Haj Said, Hanen Najjaa, Abdelhamid Farhat, Mohamed Neffati, & Sihem Bellagha, 2015; Murthy & Manohar, 2014) et la seconde (équation 17) met en relation la température avec la constante de séchage (k). Cependant, dans le cas de la déshydratation par micro-ondes, le processus n'est pas isotherme et la température ne peut pas être mesurée (Özbek & Dadali, 2007). Par conséquent, deux équations d'Arrhenius modifiées (équations 18 et 19), utilisées dans des études antérieures (Ilknur Alibas & Kacar, 2016; Hosain Darvishi, Asl, et al., 2014), ont été utilisées. Appliquée dans cette étude pour calculer l'énergie d'activation avec le logiciel STATISTICA (v.12.0). (Equation 18)

$$D_{eff} = D_0 e^{\left(\frac{-E_a}{RT}\right)} \quad (16)$$

$$k = k_0 e^{\left(\frac{-E_a}{RT}\right)} \quad (17)$$

$$D_{eff} = D_0' e^{\left(\frac{-E_a m}{P}\right)} \quad (18)$$

$$k = k_0' e^{\left(\frac{-E_a m}{P}\right)} \quad (19)$$

Où

D_{eff} : Diffusivité effective (m^2/s)

D_0 , D_0' : Facteur pré-exponentiel (m^2/s) pour le séchage par convection et par micro-ondes, respectivement

R : constante universelle des gaz (8.314 kJ/mol K),

T : Température (K)

m : Masse de l'échantillon brut (g),

P : Puissance (W)

a_w : Energie d'activation exprimée en (kJ/mol) pour le séchage convectif et en (W/g) pour le séchage micro-ondes.

k : Constante de vitesse de séchage obtenue en utilisant le meilleur modèle (1/min)

k_0 et k_0' : Constantes pré-exponentielles (1/min).

VI. Relation entre la constante de vitesse de séchage et la diffusivité effective de l'humidité

Les valeurs théoriques de la constante de vitesse de séchage (k_{th}), obtenues à partir du meilleur modèle et du les valeurs théoriques de la diffusivité effective de l'humidité ($(D_{eff})_{th}$) obtenues à partir de l'équation 16 ont été suffisamment adaptées à l'équation 20 :

$$k_{th} = A. \left(D_{eff} \right)_{th} \quad (20)$$

Où :

k_{th} : Constante de vitesse de séchage théorique (1/min)

$(D_{eff})_{th}$: Diffusivité effective théorique (m^2/s)

A : Constante de stabilisation ($min^{-1}.m^{-2}.s$).

VII. Consommation d'énergie

La consommation d'énergie peut être évaluée en utilisant deux indices d'efficacité différents, à savoir la consommation spécifique d'énergie électrique (équation 21) ou l'efficacité énergétique (équation 22) (Tsotsas & Mujumdar, 2014):

$$SEC_e = \frac{3600E}{M_s(X_i - X_f)} \quad (21)$$

Où :

SEC_e : Consommation spécifique d'énergie électrique (MJ/Kg d'eau)

E : Consommation totale d'énergie électrique (kWh)

X_i et X_f : Teneurs en humidité initiale et finale (MS) respectivement

M_s : Masse de matière solide sèche (en kg)

3600 : convertir le temps exprimé en secondes à l'heure.

$$EE = M_s (X_i - X_f) \frac{\Delta h_v}{3600E} \cdot 100 \quad (22)$$

Où

EE : Efficacité énergétique (%)

Δh_v : Enthalpie d'évaporation de l'eau (2257 KJ/Kg, à 100°C).

VIII. Analyse statistique

Afin de modéliser les données expérimentales des cinétiques, une analyse de régression non linéaire a été réalisée à l'aide du logiciel STATISTICA (v.12.0). Trois paramètres statistiques, à savoir le coefficient de détermination (R^2), le chi carré (χ^2) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE), afin de déterminer la capacité des modèles mathématiques testés à représenter les données expérimentales. Le meilleur modèle avait la valeur R^2 la plus élevée et les valeurs χ^2 et RMSE les plus faibles (Chayjan, Salari, Abedi, & Sabziparvar, 2013). Ces paramètres ont été calculés comme suit (équation 23, équation 24) :

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N - z} \quad (23)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N}} \quad (24)$$

Où :

$MR_{exp,i}$: Taux d'humidité expérimental,

$MR_{pre,i}$: Taux d'humidité prédit

N : Nombre d'observations

z : Nombre de paramètres constants dans l'équation du modèle.

Concernant les différences entre les valeurs $Deff$, SEC_e et EE , elles ont été testées par le test ANOVA univarié. La significativité des différences entre ces valeurs a été déterminée par le test de Tukey à $p \leq 0,05$. Les calculs ont été réalisés à l'aide du logiciel JMP Pro 13.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Résultats et discussion

I Séchage

I.1 Humidité de l'orange sanguine fraîche

La teneur en eau de l'orange fraîche était de 83,34%.

Au regard des résultats obtenus, les différents échantillons analysés sont constitués de presque la totalité de leur poids d'eau qui varie de 81,19 à 83,03 % (60 °C, 100 °C) respectivement. Par conséquent un pourcentage de matière sèche inférieure à : 5 à 11 fois que sa teneur en eau avec des teneurs qui varient de 16,96 à 18,80 %.

Ces résultats peuvent être comparés aux données de différents travaux menés dans le même contexte, allant de 84,2% à 90,7% dans différentes variétés d'oranges et de citrons cultivées dans le nord du Bangladesh, ce qui est similaire à nos résultats. Les variations en teneur en eau de différentes variétés d'oranges peuvent être dues aux différences physiologiques et génétiques (Del Caro, Piga, Vacca, & Agabbio, 2004) .

Cependant, les propriétés physico-chimiques peuvent varier de manière significative, en fonction de nombreux facteurs, ainsi que de la diversité entre les variétés et des facteurs environnementaux (climat, fertilité et maturité des sols).

II. Cinétique de séchage à l'étuve ventilée de l'orange Moro

II.1. Variation de la perte en masse en fonction du temps de séchage

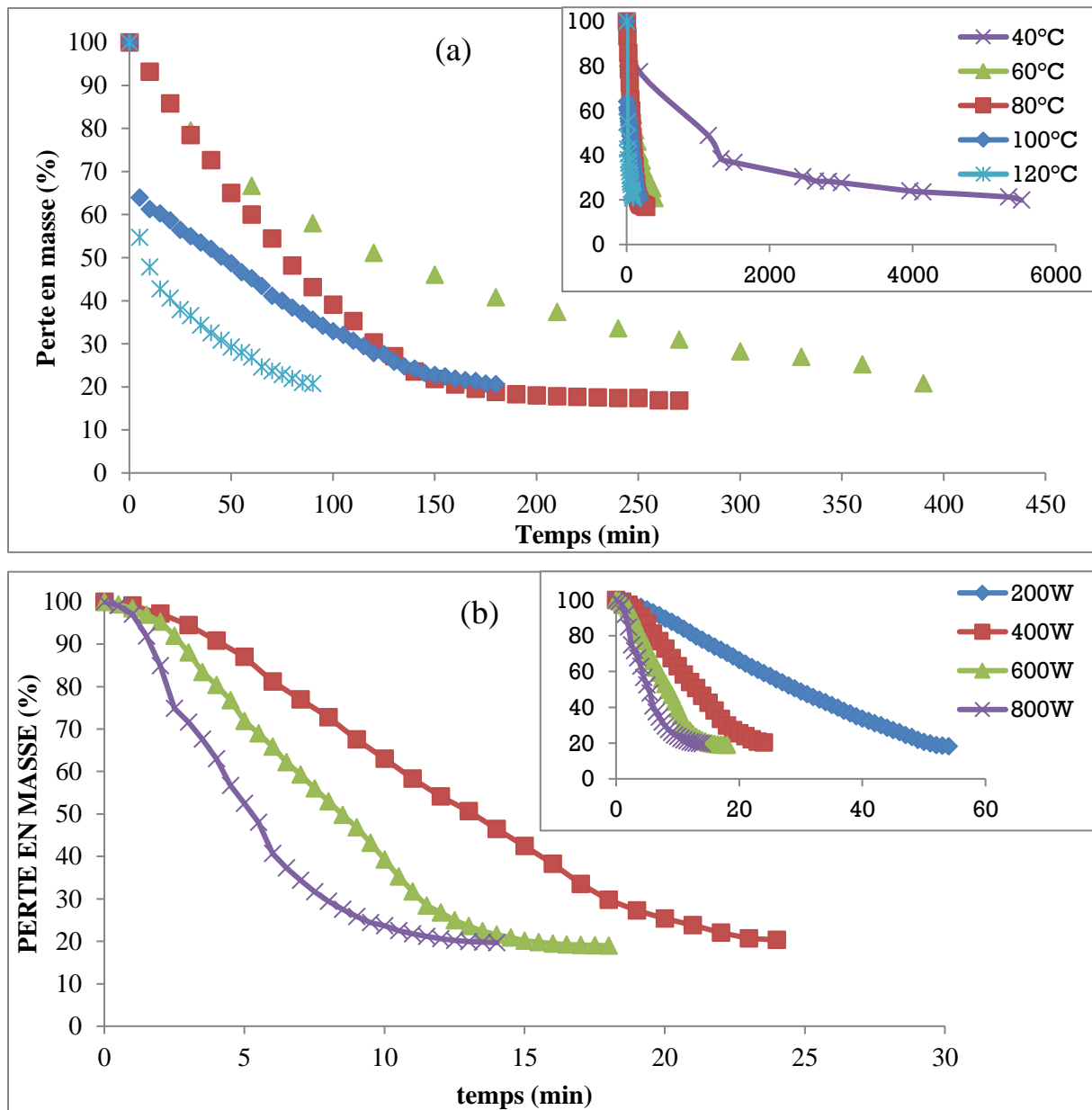


Figure 16. La perte de masse en fonction du temps de séchage à différentes températures (a) à différents niveaux de puissance (b).

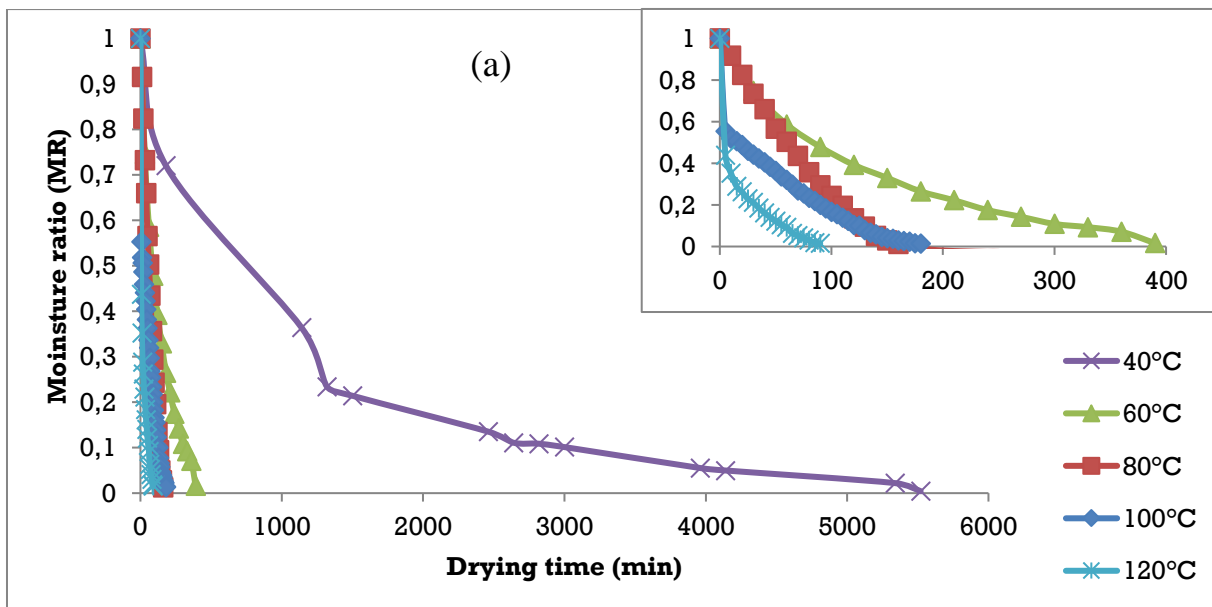
D'après la figure 16, nous constatons que la perte de masse des tranches de l'orange Moro est proportionnelle au couple temps-température du séchage à l'étuve. En effet, à haute température (80, 100 et 120°C), la perte en eau est beaucoup plus rapide (480 et 210 min, respectivement). Alors qu'à 40 °C, la masse est devenue stable après 6 jours, donc la vitesse de la perte en eau est très lente.

Les résultats obtenus montrent que le temps de séchage est inversement proportionnel à la température appliquée. La stabilité du poids s'explique par le fait que la température de la surface atteint celle de l'air sec du fait d'une migration insuffisante de l'humidité de l'intérieur vers la surface. En revanche, il se peut qu'il n'y ait plus d'eau libre dans le produit.

Selon Lahmari, Fahloul, and Azani (2012), la température a un effet sur l'évolution de la teneur en humidité pendant le séchage. L'effet de la température sur la cinétique de séchage est important, en effet, l'augmentation de la température entraîne une diminution de la teneur en humidité. Le temps de séchage des cinq températures est différent, plus la température est élevée, plus le temps de séchage est court. Une température de 40°C ne déplacera pas suffisamment la vapeur d'eau dans les aliments pour atteindre le taux d'humidité souhaité, tandis que les températures au-dessus de 100°C, entraînent la volatilisation des composants du produit, ce qui provoque la perte de qualité (Correia, Loro, Zanatta, Spoto, & Vieira, 2015).

11.2. Variation du rapport des taux d'humidité en fonction du temps de séchage

Les courbes de séchage des tranches d'orange sanguine par micro-ondes et par convection sont illustré sur la figure 17, ces résultats montrent la variation de la teneur en eau en fonction du temps de séchage.



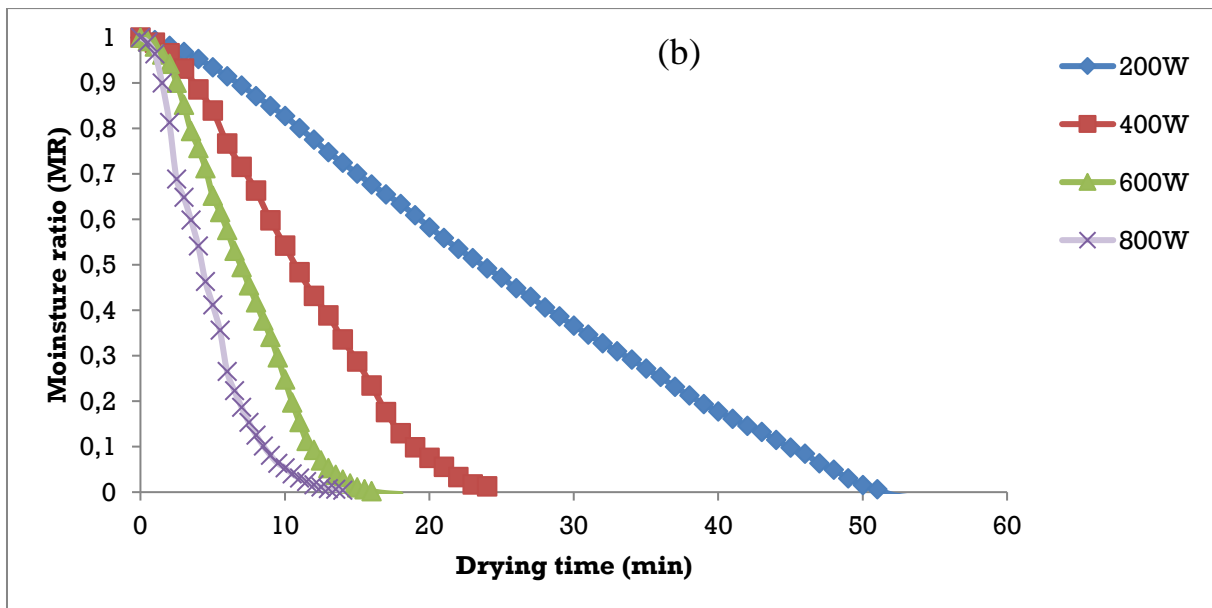


Figure 17. Variation du rapport d'humidité expérimental en fonction du temps de séchage à différentes températures (a) et du séchage par micro-ondes à différents niveaux de puissance (b).

Indépendamment de la technique de séchage, il a été observé que l'hydratation diminuait rapidement à la fois à des niveaux de puissance élevés et faibles. Au fur et à mesure de la progression du séchage, le taux de séchage était plus rapide au début et diminuait progressivement au-delà d'une période donnée. Au fil du temps, la perte d'humidité dans le fruit a entraîné une diminution de l'absorption de la puissance des micro-ondes et donc une réduction du taux de séchage (Dash, Chakraborty, & Singh, 2020). L'accroissement de la puissance du micro-onde a accéléré le processus de séchage pour atteindre une teneur en eau moyenne à l'équilibre de 4 % à base humide après 54 min à 200 W et 15,5 min à 800 W. Alors que pour l'étuve, cette teneur en eau moyenne à l'équilibre a été atteinte après 5520 min à 40 °C et 70 min à 120°C.

L'avantage de l'utilisation des micro-ondes pour la réduction significative du temps du procédé a été constaté dans d'autres travaux pour différents fruits (Agbede et al., 2020; Amini, Salehi, & Rasouli, 2021; Bennaceur et al., 2021; C. Chen et al., 2020; Mouhoubi et al., 2020).

II.3. Variation de la vitesse de séchage en fonction du temps de séchage

Le taux de séchage en fonction du temps de séchage est présenté dans la figure 18.

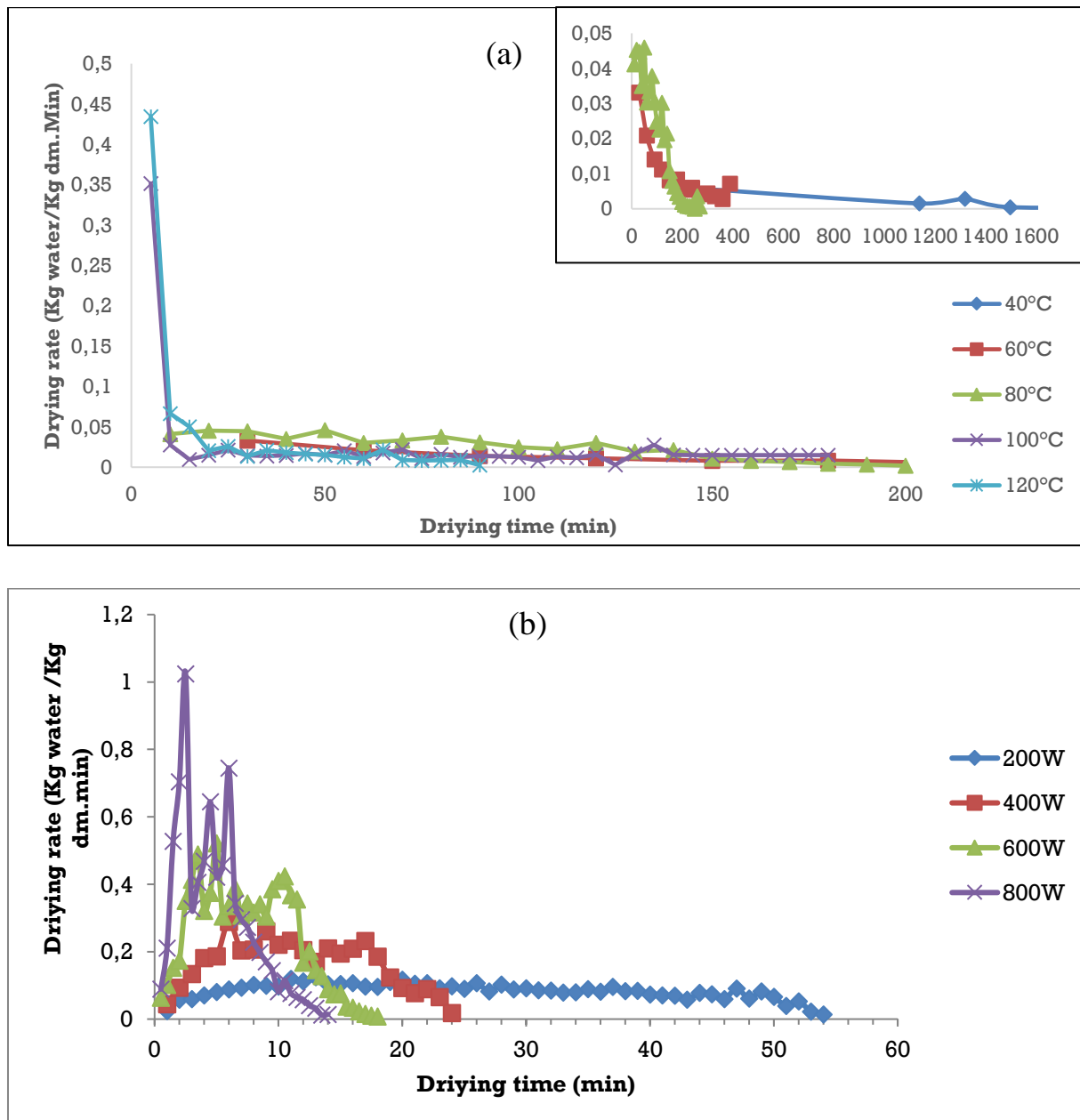


Figure 18. Variation de la vitesse de séchage en fonction du temps de séchage à différentes températures (a) et à différents niveaux de puissance (b).

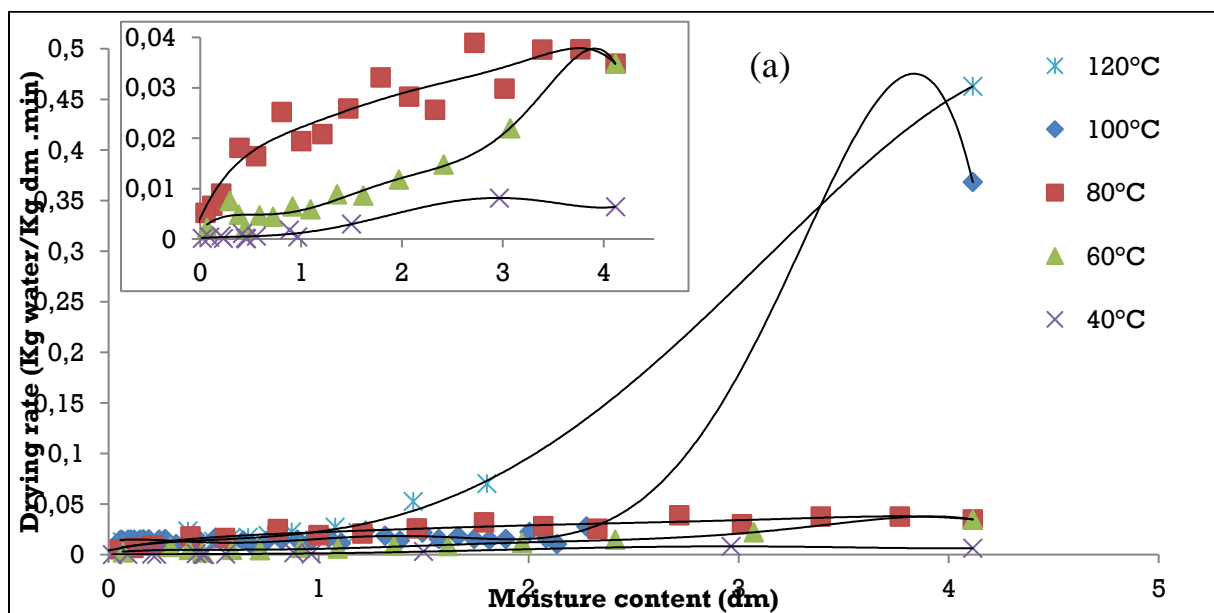
Pour le procédé à micro-ondes, on a remarqué que jusqu'à un certain niveau, le taux de séchage accroît avec le temps de séchage après il réduit progressivement. Comme prévu, pour éliminer l'eau résiduelle après le taux de séchage maximal, il faut plus de temps, ce qui réduit le taux de séchage. Par conséquent, le taux de séchage moyen varie entre 0,08 Kg d'eau/Kg MS min, à 200W et 0,29 Kg d'eau/Kg MS min, à 800W. Alors que dans le séchage par convection un

rythme différent a été observé, voir l'absence de la phase d'augmentation. Par conséquent, le taux de séchage moyen varie entre 0,001 Kg d'eau/Kg MS min, à une température de 40 °C et 0,04 Kg d'eau/Kg MS min, à une température de 120 °C.

Ce résultat peut être expliqué par les effets de l'exposition aux micro-ondes, le rayonnement absorbé augmente rapidement la température de l'eau in-situ, augmente la diffusivité et l'évaporation de l'eau, conduisant à la destruction du tissu cellulaire. Des rythmes similaires pour le séchage convectif et par rayonnement micro-ondes ont été rapportés dans les travaux de Agbede et al. (2020).

II.4. Variation de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau

La variation de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau, qui explique le comportement de séchage au micro-onde et à l'étuve des tranches d'orange sanguine, est illustrée dans la figure 19.



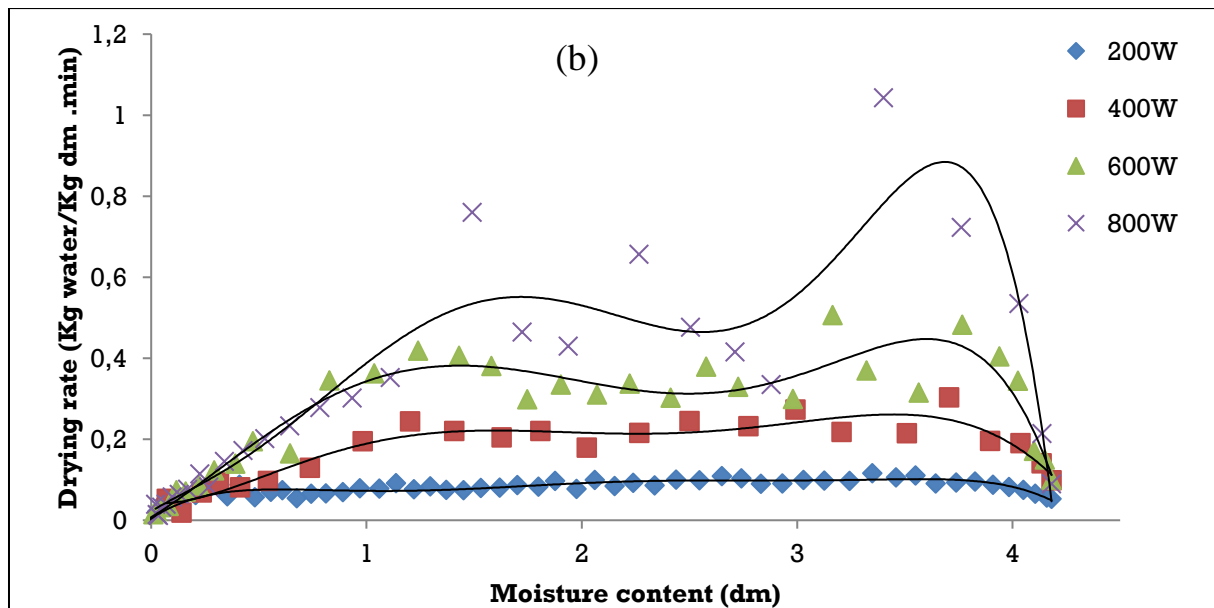


Figure 19. Variation de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau à différentes températures (a) et à différents niveaux de puissance (b).

Néanmoins, après une brève période où des taux de séchage élevés ont prévalu, les taux de séchage ont commencé à diminuer rapidement à partir d'une teneur en humidité critique donnée, puis ont continué à diminuer lentement avec la diminution de la teneur en humidité et ont pris plus de temps pour éliminer l'humidité restante, ce schéma a déjà été décrit dans des travaux antérieurs (Bishnoi, Chhikara, Singhanian, & Ray, 2020; Hosain Darvishi, Khoshtaghaza, et al., 2014; Hidar et al., 2020; Horuz, Bozkurt, Karataş, & Maskan, 2017) et s'explique par le fait qu'au début du séchage, l'humidité libre est éliminée, à ce stade, la diminution de la vitesse de séchage avec la diminution de la teneur en humidité est rapide. En dessous de la teneur en humidité spécifique, l'humidité restante est liée à la matrice, ce qui a allongé les voies de transfert d'humidité interne et génère la diminution de la vitesse de séchage, le séchage est devenu limité par le transfert d'humidité (Bennaceur et al., 2021; C. Chen et al., 2020). L'élévation de la puissance du micro-onde et de la température de l'étuve a augmenté de façon significative le taux de séchage moyen à 23,59 et 28,86 Kg d'eau/Kg dm min kg de matière sèche min^{-1} à 600 et 800 W (environ 3 et 5 fois celui à 200 W) et 1,26 et 2,00 Kg d'eau/Kg dm min Kg de matière sèche min^{-1} à 100 et 120 °C (environ 14 et 3 fois celui à 40 °C) respectivement.

Ces résultats sont conformes avec les études de Mouhoubi et al. (2022), Bennaceur et al. (2021), et Evin (2012). Ainsi, il faut noter que pendant le séchage, le taux de séchage est

proportionnel au degré de puissances des micro-ondes et de températures de l'étuve appliqué, contrairement aux temps de séchage, qui est inversement proportionnel à ces deux derniers.

L'analyse statistique présentée dans le tableau VI, a montré que les taux de séchage les plus élevés entre deux procédés ont été induits par l'application des micro-ondes, surtout lorsque des puissances élevées ont été appliquées. Cela peut s'expliquer par le fait que les micro-ondes ont l'avantage de réduire le temps de séchage qui est lié à l'absorption rapide de l'énergie par les molécules d'eau, provoquant leur évaporation rapide (Doymaz & Sahin, 2016).

Tableau VI: Analyse statistique des paramètres de séchage.

		Paramètres				
		Dt (min)	$DR (\times 10^{-2})$ (Kg H ₂ O/Kg dm.min)	$D_{eff} (\times 10^{-9})$ (m ² /s)	$SECe (\times 10^7)$ (MJ/KgH ₂ O)	$EE (\times 10^{-2})$ (%)
T(°C)	40	5521.0 ±7.94 ^{aA}	0.14 ±0.02 ^{dF}	0.07 ±0.0 ^{aC}	29.35 ±1.16 ^{aA}	0.08 ±0.00 ^{dG}
	60	359.83 ±6.53 ^{bB}	0.79 ±0.03 ^{cEF}	0.60 ±0.13 ^{aC}	2.04 ±0.16 ^{bB}	1.17 ±0.09 ^{cFG}
	80	270.50 ±5.07 ^{cC}	1.40 ±0.01 ^{bEF}	0.94 ±0.10 ^{aC}	1.72 ±0.15 ^{bcBC}	1.39 ±0.12 ^{cFG}
	100	180.17 ±5.11 ^{dD}	1.26 ±0.09 ^{bEF}	1,68 ±0,09 ^{aBC}	0.93 ±0.05 ^{bcCD}	2.55 ±0.15 ^{bF}
	120	90.33 ±4.04 ^{eE}	2.00 ±0.25 ^{aE}	1,97 ±2,70 ^{aBC}	0.49 ±0.05 ^{cD}	4.93 ±0.54 ^{aE}
P(W)	200	54.33 ±5.30 ^{aF}	8.28 ±0.54 ^{dD}	2.07 ±0.61 ^{bBC}	0.25 ±0.01 ^{aD}	9.02 ±0.37 ^{dD}
	400	24.17 ±2.47 ^{bG}	16.16 ±0.32 ^{cC}	6.00 ±2.49 ^{bBC}	0.10 ±0.00 ^{bD}	22.18 ±0.36 ^{cC}
	600	17.83 ±1.61 ^{bcG}	23.59 ±1.16 ^{bB}	8.02 ±1.14 ^{aB}	0.08 ±0.00 ^{cD}	27.92 ±0.77 ^{bB}
	800	13.83 ±1.04 ^{cG}	28.86 ±1.21 ^{aA}	15.67 ±5.42 ^{aA}	0.06 ±0.00 ^{dD}	36.93 ±0.96 ^{aA}

Le tableau présente les valeurs moyennes avec l'écart-type de la moyenne.

^{a,b} - Les mêmes lettres d'indice indiquent que les valeurs moyennes ne sont pas significativement différentes à un niveau de confiance de 95 % ($p \leq 0,05$) pour le même processus.

^{A,B} - Les mêmes lettres d'indice indiquent que les valeurs moyennes ne sont pas significativement différentes à un niveau de confiance de 95 % ($p \leq 0,05$) entre les deux procédés.

III. Modèles mathématiques empiriques en couche mince

Afin de modéliser les données de séchage dans la présente étude, 342 ajustements pour 38 modèles de couche mince ont été utilisés, tandis que les résultats des trois meilleurs modèles ($R^2 > 0,97$) parmi eux ont été présentés dans les tableaux VII et VIII qui correspondent respectivement au traitement de séchage par micro-ondes et par convection. La qualité de l'ajustement des modèles testés aux données expérimentales est basée sur le coefficient de détermination (R^2), le chi carré (χ^2) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Plus les valeurs de R^2 sont élevées et plus les valeurs de χ^2 et de RMSE sont faibles, meilleure est l'adaptation du modèle aux données expérimentales. Le modèle de Midilli et Kucuk a été sélectionné comme le meilleur ajustement pour le séchage par convection, tandis que le modèle de Sledz a été sélectionné pour les micro-ondes (tableaux VII et VIII).

Il convient de noter que le modèle de Midilli a décrit avec succès le comportement de séchage par convection de nombreux produits agricoles. (Mbegbu, Nwajinka, & Amaefule, 2021; Zannou, Pashazadeh, Ghellam, Hassan, & Koca, 2021). Le modèle de Sledz a également été choisi dans des études antérieures pour décrire le comportement de séchage par micro-ondes (Mouhoubi et al., 2020; Sledz et al., 2017; Sledz et al., 2016).

Tableau VII Les valeurs des constantes et coefficients de séchage et les paramètres statistiques des meilleurs modèles du séchage convectif.

Modèles	T(°C)	Constantes et coefficients de séchage				Paramètres statistiques		
		<i>a</i>	<i>k</i>	<i>n</i>	<i>b</i>	<i>R2</i>	χ^2	<i>RMSE</i>
Midilli et kucuk	40	0,9975	0,0115	0,6546	0,0000	0,9955	0,0006	0,0192
	60	1,0017	0,0195	0,7850	-0,0002	0,9980	0,0002	0,0125
	80	0,9849	0,3111	1,2570	-0,0004	0,9987	0,0002	0,0115
	100	0,9989	0,3804	0,1737	-0,0025	0,9930	0,0004	0,0179
	120	1,0000	0,4764	0,3284	-0,0019	0,9995	0,0000	0,0054
Fernando et Amarasingh		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>		<i>R2</i>	χ^2	<i>RMSE</i>
	40	0,0001	0,0000	0,0022		0,9933	0,0008	0,0242
	60	-0,0005	0,0000	0,0098		0,9982	0,0002	0,0118
	80	-0,0102	0,0000	-0,0008		0,9997	0,0000	0,0052
	100	0,3579	-0,0023	0,7272		0,9895	0,0005	0,0219
120	0,1117	-0,0018	0,4817		0,9991	0,0001	0,0073	
Modified page II		<i>c</i>	<i>L</i>	<i>n</i>		<i>R2</i>	χ^2	<i>RMSE</i>
	40	0,0115	1,2304	0,7014		0,9943	0,0006	0,0210
	60	0,0159	1,1967	0,9179		0,9950	0,0005	0,0196
	80	0,0087	1,5407	1,3624		0,9951	0,0006	0,0221
	100	0,0727	0,6763	0,6004		0,9247	0,0037	0,0586
120	0,0771	-0,2405	0,5102		0,9907	0,0003	0,0166	

Tableau VIII Les valeurs des constantes et des coefficients de séchage et les paramètres statistiques des meilleurs modèles du séchage micro-onde.

Modèles	P(W)	Constantes et coefficients de séchage				Paramètres statistiques		
		<i>b</i>	<i>k</i>	<i>a</i>	<i>k1</i>	<i>R2</i>	χ^2	<i>RMSE</i>
Sledz et al.	200	1,0500	0,0220	0,0118	0,1239	0,9977	0,0002	0,0151
	400	1,0612	0,0263	0,0369	0,2740	0,9987	0,0002	0,0126
	600	0,9970	0,0678	0,0085	0,5081	0,9970	0,0004	0,0192
	800	7,1978	0,4943	6,0037	-0,4769	0,9977	0,0003	0,0164
Logistic		<i>b</i>	<i>a</i>	<i>k</i>		<i>R2</i>	χ^2	<i>RMSE</i>
	200	1,1490	0,1537	0,0908		0,9953	0,0005	0,0213
	400	1,0961	0,0936	0,2510		0,9982	0,0003	0,0150
	600	1,0851	0,0836	0,3860		0,9948	0,0007	0,0254
800	1,2264	0,1974	0,4775		0,9977	0,0003	0,0165	
Parabolic		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>		<i>R2</i>	χ^2	<i>RMSE</i>
	200	1,0479	-0,0250	0,0001		0,9986	0,0001	0,0118
	400	1,0980	-0,0704	0,0010		0,9885	0,0016	0,0375
	600	1,1027	-0,1035	0,0020		0,9882	0,0017	0,0383
800	1,0932	-0,1741	0,0069		0,9933	0,0009	0,0281	

IV. Diffusion effective de l'humidité

Le coefficient de diffusion (D_{eff}) indique le taux de transfert de masse pendant le séchage ; il peut être utilisé pour décrire comment l'humidité est éliminée par unité de temps dans des conditions spécifiques. Pendant le processus de séchage dans les micro-ondes et les étuves. les diffusivités effectives dans les échantillons d'orange sanguine de la structure interne vers l'environnement externe ont été illustrées dans le tableau VI.

Ces valeurs vont de $0,07 \times 10^{-9}$ à $1,97 \times 10^{-9}$ m²/s et de $2,07 \times 10^{-9}$ à $15,67 \times 10^{-9}$ m²/s pour le séchage par étuve et par micro-ondes, respectivement.

Les D_{eff} enregistrés se situent dans la fourchette générale de 10^{-12} - 10^{-6} m²/s pour le séchage des produits agricoles (Azeez, Adebisi, Oyedeji, Adetoro, & Tijani, 2019; Erbay & Icier, 2010). Nos valeurs de D_{eff} obtenues sont comparables aux valeurs d'autres études rapportées pour le séchage de tranches de citron par micro-ondes (1.87×10^{-10} à 3.59×10^{-10} m²/s) (Hosain Darvishi, Khoshtaghaza, et al., 2014).

L'augmentation de la diffusivité effective de l'humidité avec l'augmentation des températures a également été discutée (Agbede et al., 2020; C. Chen et al., 2020; Doymaz & Sahin, 2016) ceci est expliqué par l'augmentation de la température qui active fortement les molécules d'eau, ce qui accélère leur transfert vers la surface de la matrice (Amami et al., 2017; Aral & Beşe,

2016). Cependant, son augmentation lors de l'utilisation du processus de séchage par micro-ondes est liée à l'énergie absorbée par l'humidité, qui augmente avec l'augmentation du niveau de puissance des micro-ondes (Agbede et al., 2020; Zhu et al., 2015).

L'analyse statistique des valeurs D_{eff} obtenues pour le même processus de séchage a montré qu'il n'y avait pas de différences significatives entre les valeurs obtenues pour toutes les températures en utilisant le processus de séchage à l'étuve. L'application de faibles niveaux de puissance (200-400 W) dans le séchage par le micro-onde n'a pas conduit à une différence significative des valeurs D_{eff} , cependant, une différence significative des valeurs D_{eff} est enregistrée à des niveaux de puissance de 600 W ou plus.

L'analyse statistique des valeurs D_{eff} pour les deux processus de séchage a montré que les valeurs enregistrées pour toutes les températures ne sont pas statistiquement différentes de celles enregistrées à 200 et 400 W.

Par conséquent, les puissances de 600 W et 800W sont beaucoup plus élevées, et montrent des différences significatives entre elles, entre elles et le reste de toutes les autres valeurs de D_{eff} . Ces résultats sont très similaires à ceux de Mouhoubi et al. (2020).

V. Énergie d'activation (E_a)

C'est l'énergie utilisée pour fragiliser la liaison entre les particules d'humidité et elle est inversement proportionnelle à la diffusivité effective. Le calcul de l'énergie d'activation pour les deux procédés de séchage : convection et micro-ondes a été déterminé en estimant les coefficients à l'aide des équations (11) et (12). Les valeurs obtenues pour les processus de séchage ont été estimées à 23,53 KJ/mol pour la convection et à 8,87 W/g pour les micro-ondes.

D'une part, les valeurs E_a rapportées pendant le séchage par convection se situent dans une fourchette générale de 12,7 à 110 kJ/mol pour les fruits et légumes (Aral & Beşe, 2016; Kaveh & Amiri Chayjan, 2017; Wang et al., 2018; Zogzas, Maroulis, & Marinos-Kouris, 1996) et elles étaient très proches de la valeur obtenue par l'analyse de l'énergie d'activation d'I. Alibas and Yilmaz (2021) avec une E_a de presque 20,5 KJ/mol.

Et des valeurs légèrement inférieures rapportées dans la littérature, lors du séchage de tranches de nectarines (31,28 et 35,23 kJ/mol à des températures allant de 50 à 70 °C) (Alaei & Chayjan, 2015), des écorces d'orange (34,19 KJ/mol) (Deng et al., 2019), des tranches de tomates (31,19 kJ/mol) (Azeez et al., 2019), le gingembre mangue (32,6 KJ/mol) (Murthy & Manohar, 2014),

le cerneau de noix (31,63 KJ/mol) (C. Chen et al., 2020), et la citrouille (33,74 KJ/mol) (Guiné, Pinho, & Barroca, 2011).

D'autre part, les valeurs E_a obtenues lors du séchage par micro-ondes étaient proches de celles enregistrées pour les tranches de citron (10,911 W/g) (Hosain Darvishi, Khoshtaghaza, et al., 2014), pour le gombo (5,54 W/g) (Dadalı, Kılıç Apar, & Özbek, 2007), pour les feuilles de basilic (11,41 W/g) (Elçin Demirhan & Özbek, 2009), mais inférieures à celles rapportées précédemment pour le séchage des tranches de kiwi (21,38 W/g) (Hosain Darvishi et al., 2016) l'*Hypericum perforatum L.* (28,68 W/g) (Ilknur Alibas & Kacar, 2016) et les tranches d'orange (60 W/g) (I. Alibas & Yilmaz, 2021).

La variabilité des valeurs E_a peut être liée à des différences de cultivars, à des épaisseurs de surface spécifiques, à l'état de maturité du produit, aux prétraitements appliqués et aux conditions de séchage (Deng et al., 2019; Jha et al., 2021).

VI. Consommation d'énergie

Au cours de chacun des deux techniques de séchage et à des différents niveaux appliqués, l'énergie consommée a été évaluée en calculant deux indices : SEC_e et EE . Les résultats des calculs de ces indices ont été présentés dans le tableau VI.

Comme mentionné sur le tableau, la consommation spécifique d'énergie électrique diminue lorsqu'on passe de faibles températures ou niveaux de puissance à des températures ou niveaux de puissance plus élevés pour le séchage convectif et micro-ondes, respectivement. Les valeurs de SEC_e varient ainsi dans les plages de $0,49 \times 10^7$ à $29,35 \times 10^7$ MJ/Kg H₂O et de $0,06 \times 10^7$ à $0,25 \times 10^7$ MJ/Kg H₂O dans le même ordre respectif.

Un comportement opposé a été observé pour les variations de l'énergie électrique, les valeurs de l' EE augmentent lorsqu'on passe de faibles températures ou niveaux de puissance à des températures ou niveaux de puissance élevés. Les valeurs EE varient de $0,08 \times 10^{-2}$ à $4,93 \times 10^{-2}$ % pour l'étuve et de $9,02 \times 10^{-2}$ à $36,93 \times 10^{-2}$ % pour le micro-onde.

La variation simultanée de ces deux paramètres est illustrée sur la figure 20.

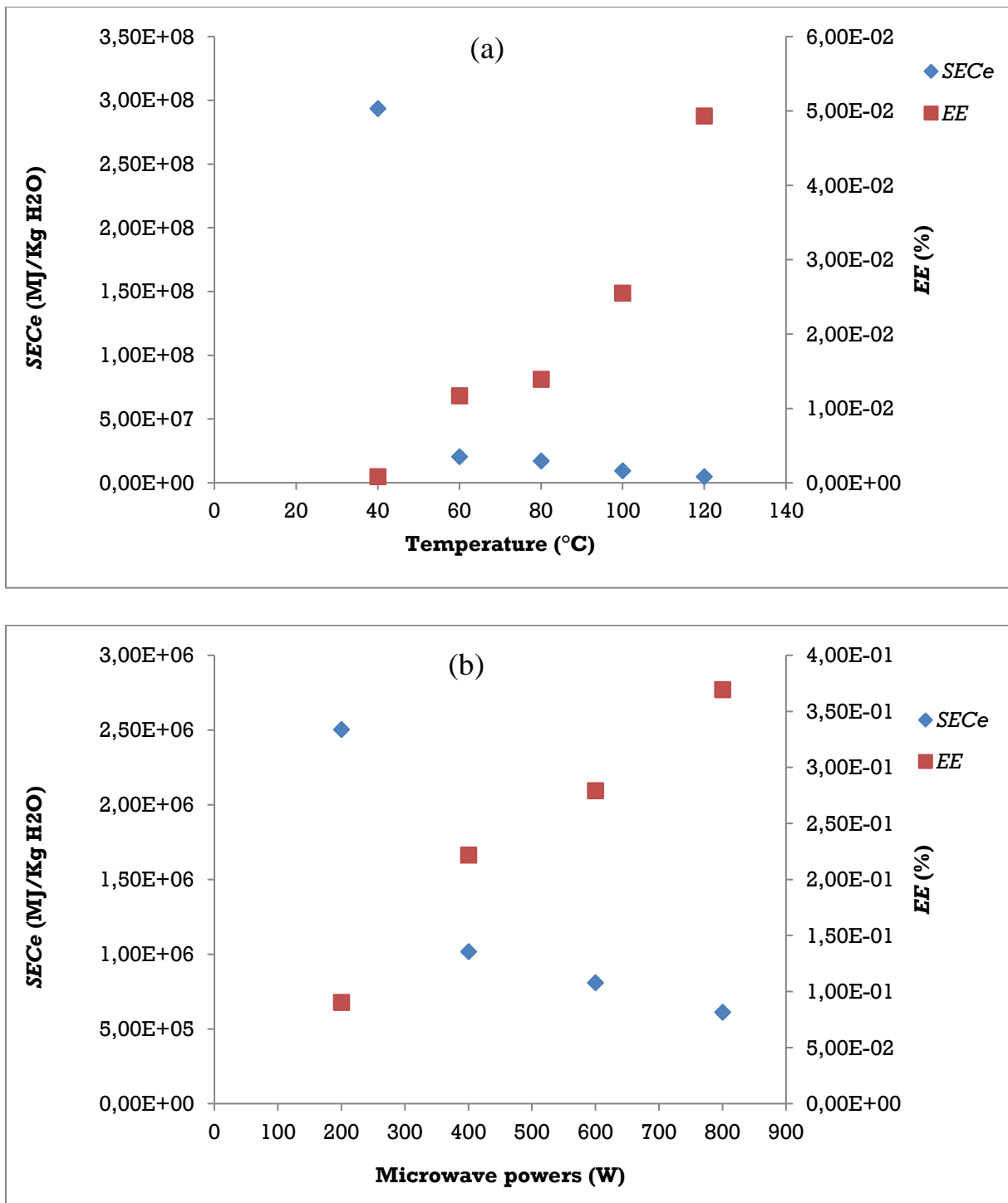


Figure 20. Variations de la consommation spécifique d'énergie électrique (SEC_e) et d'énergie électrique (EE) : (a) séchage convectif et (b) séchage aux micro-ondes

L'analyse statistique a montré des différences significatives claires pour les valeurs SEC_e de la déshydratation par micro-ondes pour toutes les puissances utilisées et pour les valeurs obtenues après déshydratation à la température de 40 °C et 120 °C. Il en est de même pour les valeurs

EE sauf pour les températures de 60 °C et 80 °C qui n'ont pas présenté des différences significatives.

L'analyse statistique des valeurs SEC_e pour les deux processus de séchage a montré que la consommation d'énergie la plus élevée était attribuée à la température de 40 °C, qui présentait une différence significative pour toutes les températures et tous les niveaux de puissance, alors qu'aucune différence significative n'a été observée pour toutes les puissances utilisées, ainsi que pour les températures élevées (100 °C et 120 °C). En ce qui concerne l'efficacité énergétique, une différence significative a été observée après le passage d'un niveau de puissance à un autre, qui à son tour différait à toutes les températures. En outre, des chevauchements sont observés pour les valeurs d'*EE* obtenues pour toutes les températures, sauf pour 120 °C. Comparativement, il apparaît que la consommation d'énergie la plus élevée a été obtenue pour le séchage par convection (49×10^7 MJ/Kg H₂O) et que le meilleur rendement énergétique a été obtenu pour le séchage par micro-ondes ($0,25 \times 10^7$ MJ/Kg H₂O). Cela suggère que la consommation d'énergie est proportionnellement liée au temps de séchage, tandis que l'efficacité énergétique est inversement liée au temps de séchage.

Il est intéressant de noter que des tendances similaires ont été signalées par Ilknur Alibas (2014), Amiri Chayjan and Shadidi (2014), Hosain Darvishi, Khoshtaghaza, et al. (2014), Zarein, Samadi, and Ghobadian (2015), Sledz et al. (2017), Maftoonazad, Dehghani, and Ramaswamy (2020) et (Kaveh, Abbaspour-Gilandeh, & Nowacka, 2021).

Conclusion partielle

Cette étude porte sur la modélisation de la cinétique du séchage en couche mince des tranches de *Citrus sinensis [L.] Osbeck*, ainsi que sur les aspects énergétiques du séchage par micro-ondes et à l'étuve. Le séchage par micro-ondes utilisé, a réduit de manière significative le temps de séchage et a été utilisé efficacement pour déshydrater notre fruit, par rapport au séchage convectif.

Trente-huit modèles mathématiques de séchage en couche mince ont été appliqués pour expliquer la cinétique du séchage. Les modèles de Midilli et de Kucuk et de Sledz et al étaient les mieux adaptés pour le séchage à l'étuve et au micro-ondes respectivement.

Le taux de séchage et la diffusivité d'humidité ont augmenté avec l'ordre croissant de la température et de la puissance appliquée. La réduction de la teneur en humidité pendant le séchage a entraîné une amplification de la diffusivité effective d'humidité, allant de $0,07 \times 10^{-9}$ à $4,01 \times 10^{-9}$ m²/s pour la convection et de $1,42 \times 10^{-9}$ à $15,67 \times 10^{-9}$ m²/s pour les micro-ondes.

L'efficacité du séchage a varié de $0,08 \times 10^{-2}$ à $4,93 \times 10^{-2}$ % et de $9,02 \times 10^{-2}$ à $36,93 \times 10^{-2}$ % et l'énergie d'activation était de 33,69 kJ/mol, et de 8,87 W/g pour l'étuve et le micro-onde respectivement. Cependant, la consommation d'énergie spécifique était comprise entre $0,49 \times 10^7$ et $29,35 \times 10^7$ MJ/Kg H₂O pour le séchage par convection, et entre $0,06 \times 10^7$ et $0,25 \times 10^7$ MJ/Kg H₂O pour le séchage par micro-ondes.

La présente étude démontre que la technique de séchage par micro-ondes peut être utilisée pour déshydrater au mieux l'orange sanguine.

Ce travail est important non seulement parce qu'il fournit une référence significative pour une technique de séchage efficace en termes de temps, de chaleur et d'énergie pour la production industrielle de tranches et de poudre d'orange, mais aussi parce qu'il permet la récupération du fruit entier avec zéro déchet.

PARTIE B :

ÉVALUATION DE LA

QUALITÉ ET ACTIVITÉS

BIOLOGIQUES

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Matériel et méthodes

I. Matériel végétal

La description de la variété du matériel végétal ainsi que sa collecte ont été traitées dans la section matériel et méthode de la partie A : Séchage et modélisation (Voir Page 48).

I.1. Taux d'humidité et matière sèche

La procédure de calcul de la teneur en humidité (TH) et la teneur en matière sèche (MS) de l'orange Moro *Citrus sinensis* [L.] Osbeck a été détaillée dans la section matériel et méthode de la partie A : Séchage et modélisation (Voir page 49).

I.2. Séchage

La procédure du séchage des tranches d'orange sanguine par les deux procédés, micro-ondes et convectif ont été détaillés dans la section matériel et méthode de la partie A : Séchage et modélisation (Voir page 49).

I.3. Broyage et tamisage

Après obtention d'une masse constante des échantillons de tranches d'orange sanguine séchées (Figure 22), les échantillons ont été réduits en poudres fines à l'aide d'un broyeur électrique (Figure 21.a), puis tamisés à l'aide d'un tamiseur automatique (Figure 21.b), jusqu'à avoir une granulométrie $<125\mu\text{m}$. Les poudres obtenues (Figure 21.c) ont été conservées dans des bocaux en verre ombrés, scellées hermétiquement pour des analyses ultérieures.

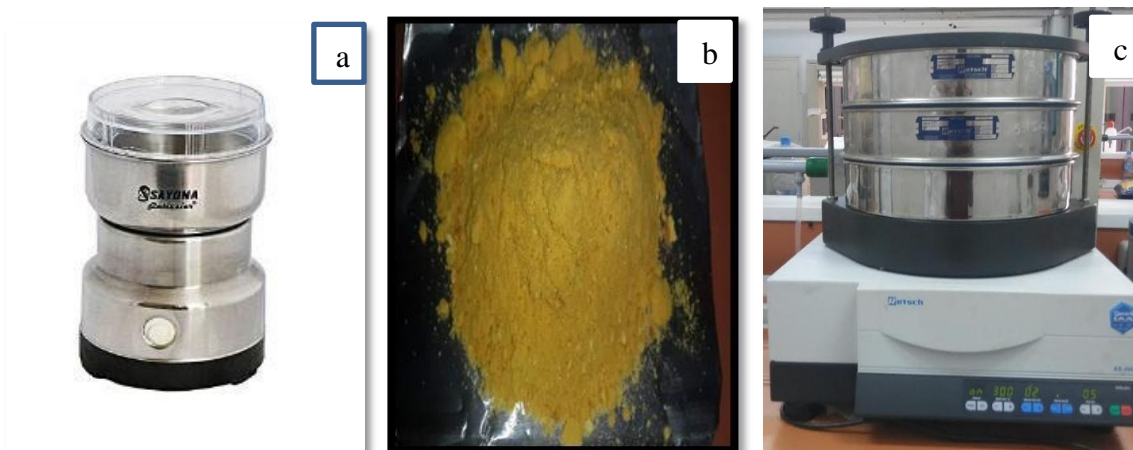


Figure 21. Photographie du broyeur électrique (a), poudre de l'orange Moro (b), tamiseur automatique (c)



Figure 22. Photographie des tranches d'orange sanguine après séchage

II. Effet du séchage sur la composition de *Citrus sinensis* [L.] Osbeck

II.1 Matière sèche

La matière sèche (MS) est calculée à partir du taux d'humidité, obtenue par séchage à l'étuve à 103 °C, comme suit :

$$MS\% = 100 - TH\%$$

II.2 Matière minérale et matière organique

La teneur en minéraux dans les échantillons de poudre orange est déterminée en incinérant des échantillons de 3 g à 900°C. La combustion a lieu dans un four à moufle. La minéralisation dure 3 heures jusqu'à combustion totale de la matière organique et qu'un résidu blanchâtre apparaisse (NF V03-720, 2010). Les creusets sont placés dans un dessiccateur et pesés immédiatement après refroidissement.

$$\% = \frac{(w - t) \times 100}{p.e.}$$

Où :

W : Masse du creuset après calcination (g),

t : La tare du creuset (g),

p.e : La prise d'essai (g).

II.3 Acide ascorbique

Le dosage de l'acide ascorbique est effectué selon la méthode de Klein and Perry (1982) modifiée par Yen, Yen, Huang, Cheng, and Huang (2008). Le dosage se fait à l'aide d'un oxydant (2,6-dichlorophénol-indophénol (2,6-DCPIP)) qui sert comme indicateur coloré également.

L'extraction est réalisée avec 0,5g de poudre dans 10 ml d'acide oxalique 1% que l'on centrifuge 15 min à 3000 tours/min. 5 ml de surnageant sont prélevés et mélangés à 9 ml de DCPIP à 0.2 mM. Le milieu réactionnel est homogénéisé pendant 15 secondes et l'absorbance est lue à 515 nm. Les résultats sont exprimés en mg Eq AA/g MS.

Dans des conditions similaires, une courbe d'étalonnage est réalisée, avec une gamme de concentrations d'acide ascorbique de 0 à 500 µg.

II.4 caroténoïdes

Les caroténoïdes des poudres séchées de l'oranges sanguine ont été extraits par la méthode conventionnelle du solvant en suivant la procédure de Yan, Fan, He, and Gao (2015). Environ 1 g de poudre a été introduit dans un flacon contenant 40 ml du mélange de solvants hexane/acétone (7/3, v/v). Dans un bain Marie à agitation (modèle WNB22, Memmert, Frankfurt, Allemagne), le flacon a été partiellement immergé à une température d'extraction de 60°C pendant 180 min. Après le processus d'extraction, le flacon a été refroidi et un volume d'eau distillée équivalent à ½ du volume du solvant a été ajouté après filtration. L'extrait a été centrifugé à 9000 rpm/5 min (Orto Alresa, 21R, Madrid, Espagne) pour séparer les deux phases (hydrophobes et réactives). La teneur totale en caroténoïdes a été quantifiée en mesurant l'absorbance du surnageant à 450. Une courbe d'étalonnage du β-carotène a été réalisé dans les mêmes conditions. Les résultats ont été exprimés en µg EβC/g MS.

II.5 Fonctions et liaisons chimiques

Les poudres d'orange sanguine séchées à différentes puissance et température ont été analysées par spectrophotométrie infrarouge à transformée de Fourier (FT-IR). Une masse de chaque poudre a été mélangée avec du bromure de potassium (KBr) séché et comprimée en un disque de sel qui est soumis à une analyse FT-IR entre 400 et 4000 cm⁻¹.

II.6 Composés phénoliques

II.6.1 Protocole d'extraction

Les extraits bruts des échantillons étudiés ont été obtenus par macération. Une masse de poudre 1,25 g a été mélangée avec 25 ml de solvant d'extraction (éthanol à 96 %, v/v) ; le mélange a été mis sous agitateur magnétique à température ambiante pendant 24 h. Après macération, le mélange a été filtré à l'aide d'un papier filtre, le filtrat correspond à la fraction éthanolique.

II.6.2 Couleur des extraits polyphénoliques

L'indice de couleur (IC) a été déterminé selon la méthode de Kelebek et al. (2008), en mesurant l'absorbance des extraits à différentes longueurs d'ondes (420, 520 et 620 nm) pour déterminer le pourcentage des trois couleurs (bleu, jaune et rouge) et la teinte selon les équations suivantes :

$$IC = \sum (A_{420nm} + A_{520nm} + A_{620nm})$$

$$\% \text{ de la couleur bleue} = \left(\frac{A_{420nm}}{IC} \right) \times 100$$

$$\% \text{ de la couleur jaune} = \left(\frac{A_{520nm}}{IC} \right) \times 100$$

$$\% \text{ de la couleur rouge} = \left(\frac{A_{620nm}}{IC} \right) \times 100$$

$$La \text{ teinte} = \frac{A_{420nm}}{A_{520nm}}$$

II.6.3. Indice des polyphénols

L'indice des polyphénols est une méthode basée sur la mesure directe de l'absorbance à 280 nm des différents extraits dilués. Les résultats sont exprimés en unité d'absorbance (AU). L'indice des polyphénols est calculé selon l'équation suivante :

$$IPP = \left[Abs_{280nm} \times FD \times \left(\frac{1 \text{ cm}}{b} \right) \right] - 4$$

Où :

IPP : Indice des polyphénols ;

Abs_{280nm} : Absorbance de l'échantillon ;

FD : Facteur de dilution ;

b : Trajet optique de la cuve.

II.6.4 Polyphénols totaux

La teneur en polyphénols totaux est estimée selon la méthode de Singleton and Rossi (1965). Un volume de 0,2 ml de chaque extrait a été mélangé avec 1,5 ml du Folin-Ciocalteu (10%). Après 5 minutes, on rajoute 1,5 ml d'une solution de carbonate de sodium (6%). Le mélange a été incubé à température ambiante à l'obscurité pendant 30 min et l'absorbance est mesuré par un spectrophotomètre UV-visible à 725 nm. En se référant à une courbe d'étalonnage avec les polyphénols de référence d'acide gallique réalisée dans les mêmes conditions, la teneur totale en phénol a été calculée.

II.6.5. Flavonoïdes

La méthode décrite par Khennouf, Iratni, Baghiani, and Arrar (2010) a été utilisée pour déterminer la teneur en flavonoïdes totaux. Un volume de 1 ml du trichlorure de l'aluminium (AlCl₃) à 2% (m/v) a été mélangé avec 1 ml d'extraits dilués. Des lectures d'absorption à 415 nm ont été prises après 10 minutes d'incubation à l'obscurité et à température ambiante contre un témoin préparé dans les mêmes conditions ne contenant pas d'extrait. Les résultats ont été calculés, en se référant à une courbe d'étalonnage avec de la quercitrine réalisée dans les mêmes conditions et exprimés en mg Eq Q/g de matière sèche.

II.6.6. Anthocyanes

La méthode du pH-différentiel (J. Lee, Durst, Wrolstad, Kupina, & JD, 2005) a été optée pour effectuer les dosages des anthocyanes totaux. Elle est basée sur la capacité de changement de couleur des anthocyanes à des différents pH. Les anthocyanes monomériques totaux, présentent sous la forme d'oxonium (coloré), qui est stable à pH 1, et la forme hémicétale (décoloré) prédominante à pH 4,5. La différence dans l'absorbance des pigments à 520 nm (entre le pH 1 et 4,5) est proportionnelle à la concentration en pigment anthocyanique. Les anthocyanes dégradés, sont résistants au changement de couleur indépendamment du pH et elles ne sont pas inclus dans la mesure (car elles absorbent à pH 4,5 comme à pH 1,0). Les concentrations en anthocyanes sont calculées selon l'équation suivante :

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

Où :

A : $A = (A_{520nm} - A_{700nm})_{pH_{1,0}} - (A_{520nm} - A_{700nm})_{pH_{4,5}}$

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

FD : Facteur de dilution ;

ϵ : Coefficient d'extinction molaire de la cyanidine-3-glucoside = 26900 (en L·mol⁻¹·cm⁻¹)

l : Trajet optique de la cuve (en cm).

II.6.7 Tannins condensés totaux

La teneur totale en tanins condensés a été évaluée suivant la méthode de Hagerman (2002). Brièvement, 625 µl du réactif analytique (315 µl de solution de vanilline (1%) mélangée à 315 µl de solution de HCl (8%)) ont été ajoutés à 125 µl d'extraits dilués ou de catéchine (contrôle positif). Après 30 s; 625 µl de solution HCl (4 %) ont été ajoutés et le flacon de mélange a été

incubé pendant 20 min à 30 °C. L'absorbance a été lue à 500 nm et les résultats ont été exprimés en mg d'équivalent acide tannique par g de matière sèche (mg AT/g MS).

III. Evaluation des activités biologiques

III.1. Activité antioxydante

III.1.1. Test à l'ABTS^{·+}

Le pourcentage d'inhibition du radical ABTS^{·+} est évalué par la méthode de Ramful et al. (2010). La solution d'ABTS^{·+} préparée par le mélange de 7 mM d'ABTS et de 2,45 mM de persulfate de potassium, puis incubée pendant 12-16 h à l'abri de la lumière et à température ambiante avant l'utilisation. La solution d'ABTS^{·+} est diluée avec l'éthanol jusqu'à l'obtention d'une absorbance de 0,7 à 734 nm, 2 ml de la solution d'ABTS^{·+} est additionné à 100 µl d'extrait. Après incubation de 7 min à l'obscurité et à température ambiante, la réaction de réduction de la solution d'ABTS^{·+} est évalué par mesure de l'absorbance à 734 nm. Le pouvoir antiradicalaire de l'extrait phénolique est exprimé comme suit :

$$ABTS (\% \text{ d'inhibition}) = \frac{(A_0 - A_1)}{A_0} \times 100$$

Où :

A_0 : Absorbance du contrôle.

A_1 : Absorbance de l'extrait + ABTS^{·+} à 734 nm.

III.1.2. Test DPPH[·]

La méthode d'Achat et al. (2012) modifiée a été utilisé pour mesurer L'activité de piégeage des radicaux libres des extraits. En bref, 0,5 ml d'extrait a été ajouté à 1 ml de solution fraîche de DPPH (0,2 mM dans du méthanol, 99 %). Le mélange a été incubé dans l'obscurité à 25 °C pendant 30 min et l'absorbance a été mesurée à l'aide d'un spectrophotomètre UV-vis à 517 nm. Les résultats ont été exprimés en pourcentage d'inhibition du radical 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl (DPPH.), calculé selon l'équation, par rapport à l'acide ascorbique comme standard :

$$DPPH (\% \text{ d'inhibition}) = \frac{(A_0 - A_1)}{A_0} \times 100$$

Où :

A_0 : Absorbance du control à 515 nm.

A_1 : Absorbance de l'échantillon à 515 nm.

III.1.3. Pouvoir réducteur (FRAP)

Le pouvoir réducteur des extraits a été évalué par la méthode de Debbabi et al. (2016) avec certaines modifications. Une série de dilutions des extraits a été préparée dans un tampon phosphate (0,2 M, pH 6,6). Puis, l'extrait, le ferrocyanure de potassium (1 %, p/v) et le tampon phosphate ont été mélangés à des volumes égaux (500 µL chacun). Après incubation à 50 °C pendant 20 min, 500 µl d'acide trichloracétique (TCA : 10 % p/v) ont été ajoutés au mélange réactionnel. 1 ml de surnageant a été prélevé et additionné d'eau distillée (1 ml) et de 0,2 ml de chlorure ferrique (0,1 %, p/v). Contre un blanc préparé dans les mêmes conditions, l'absorbance a été mesurée à 700 nm après 30 min d'incubation. L'acide ascorbique est utilisé comme antioxydant standard pour représenter le contrôle positif. Les résultats ont été exprimés en mg Eq AA/g MS.

III.2 Test de cytotoxicité

Le sang des personnes saines a été centrifugé à 3000 rpm pendant 10 min. Le surnageant a été jeté, et le culot est lavé avec du sérum physiologique 3 fois. Lors du dernier lavage, les globules rouges (GR) ont été reconstitués sous forme de suspension (10%) dans 10 volumes de NaCl à 0,9 % pour être utilisés dans le test de cytotoxicité (Abbou et al., 2019; Oyedapo & Famurewa, 1995). Pour réaliser ce test, 1 volume d'extrait à une concentration connue (mg/ml) a été mélangé à un volume de la suspension de GR et incubé à température ambiante pendant 10 min. L'absorbance du surnageant récupéré après centrifugation à 3000 rpm pendant 10 min a été mesurée à 540 nm à l'aide d'un spectrophotomètre pour évaluer leur activité hémolytique. La lyse des GR en présence d'eau distillée a été considérée comme une activité hémolytique de 100 % (Pagano & Faggio, 2015). L'hémolyse en présence des extraits a été calculée par rapport à cette hémolyse témoin.

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

Où :

A₀ : était l'absorbance du contrôle (eau distillée sans extrait)

A₁ : était l'absorbance en présence de l'extrait.

IV. Analyse statistique

Les données du TCC ont été réalisées en triplicata et exprimées en tant que moyenne ± écart-type et comparées par des analyses de variance (ANOVA-Tukey test) avec un niveau de signification de 5 % (p<0.05) en utilisant le logiciel JMP Pro 13. Les présentations des résultats ont été réalisées avec Microsoft Excel 2019.

^{a,b} - Les mêmes lettres d'indice indiquent que les valeurs moyennes ne sont pas significativement différentes à un niveau de confiance de 95 % ($p \leq 0,05$) pour le même processus.

^{A,B} - Les mêmes lettres d'indice indiquent que les valeurs moyennes ne sont pas significativement différentes à un niveau de confiance de 95 % ($p \leq 0,05$) entre les deux procédés.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Résultats et discussion

I. Effet du séchage sur la composition de l'orange sanguine

I.1 Matière sèche et activité de l'eau

L'efficacité du séchage a été évaluée en termes d'humidité et d'activité de l'eau pour les poudres d'orange sanguine obtenues après séchage à différentes conditions et broyage.

La teneur en eau est un critère de qualité utilisée essentiellement pour estimer le degré d'humidité des poudres, elle conditionne la conservation du produit. Les taux d'humidité (TH%) et de matière sèche (MS %) sont représentés ci-dessous (Figure 24).

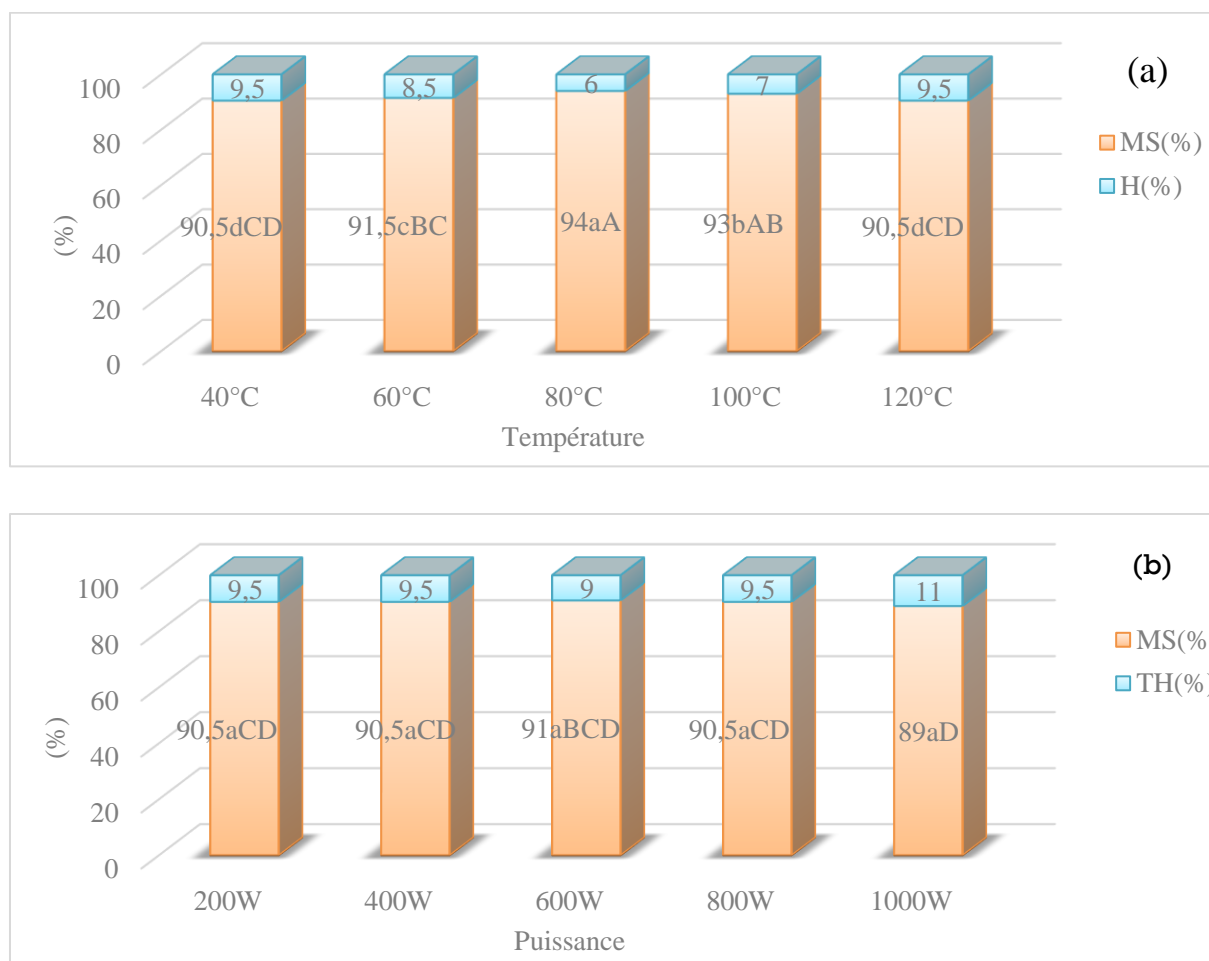


Figure 23. Taux d'humidité et de matière sèche des poudres d'orange sanguine.

(a) Séchage par convection, (b) séchage par micro-ondes

Les résultats dévoilent que le séchage conventionnel permet de déshydrater mieux les tranches d'orange sanguine que le séchage par micro-ondes, en effet d'après les résultats de la figure 24, il s'est avéré que les poudres séchées par la méthode conventionnelle ont présenté des teneurs

qui varie de 6 à 9,5 % tandis que celles des poudres séchées par micro-ondes varie de 9 à 11%. Ce constat est renforcé par les niveaux d'activité de l'eau atteintes (Tableau IX).

Ces valeurs sont proche de celles trouvées par Kammoun Bejar, Ghanem, Mihoubi, Kechaou, and Boudhrioua Mihoubi (2011) sur les écorces d'orange séchés à 600W (10 %) et à 70 °C (11,9 %), inférieures à la teneur en humidité des tranches d'orange séchées au micro-ondes sous vide (6,83 %) et à l'étuve (6,5 %) (Bozkir, 2020). Cependant elles sont supérieures aux valeurs de la teneur en humidité des pelures d'orange séchées par convection (5 %) et par micro-onde sous vide (5,3 %) (Dong et al., 2021). Il est à noter que ces paramètres peuvent être affectés par la durée et les conditions de stockage de la poudre.

Tableau IX . Activité de l'eau des poudres séchées de *Citrus Sinensis [L.] Osbeck*.

		Activité de l'eau (a_w)				
Puissance (W)	200	400	600	800	1000	
	0,40±0,01 ^{b,D}	0,49±0,01 ^{a,A}	0,44±0,01 ^{ab,BCD}	0,45±0,01 ^{ab,ABCD}	0,47±0,01 ^{ab,ABC}	
Température (°C)	40	60	80	100	120	
	0,45±0,004 ^{ab,ABC}	0,46±0,01 ^{a,ABC}	0,42±0,003 ^{c,CD}	0,43±0,00 ^{bc,BCD}	0,46±0,009 ^{a,AB}	

L'activité de l'eau est comprise entre 0,40 à 200 W et 0,49 pour le procédé micro-ondes, et entre 0,42 à 80 °C, à 0,46 à 60 °C ($p \leq 0,05$), les valeurs sont tellement proches que des fluctuations sont observées.

Afin de assurer la qualité et de garantir la stabilité physico-chimique et microbiologique du produit pendant le stockage, il est recommandé une valeur d'activité de l'eau de 0,6 comme limite supérieure (Cordeiro, Raghavan, & Oliveira, 2006).

I.2 Matière minérale et matière organique

Le taux de cendre qui représente la matière minérale (MM %) et le taux de la matière organique (MO %) sont représentés sur les histogrammes de la Figure 24.

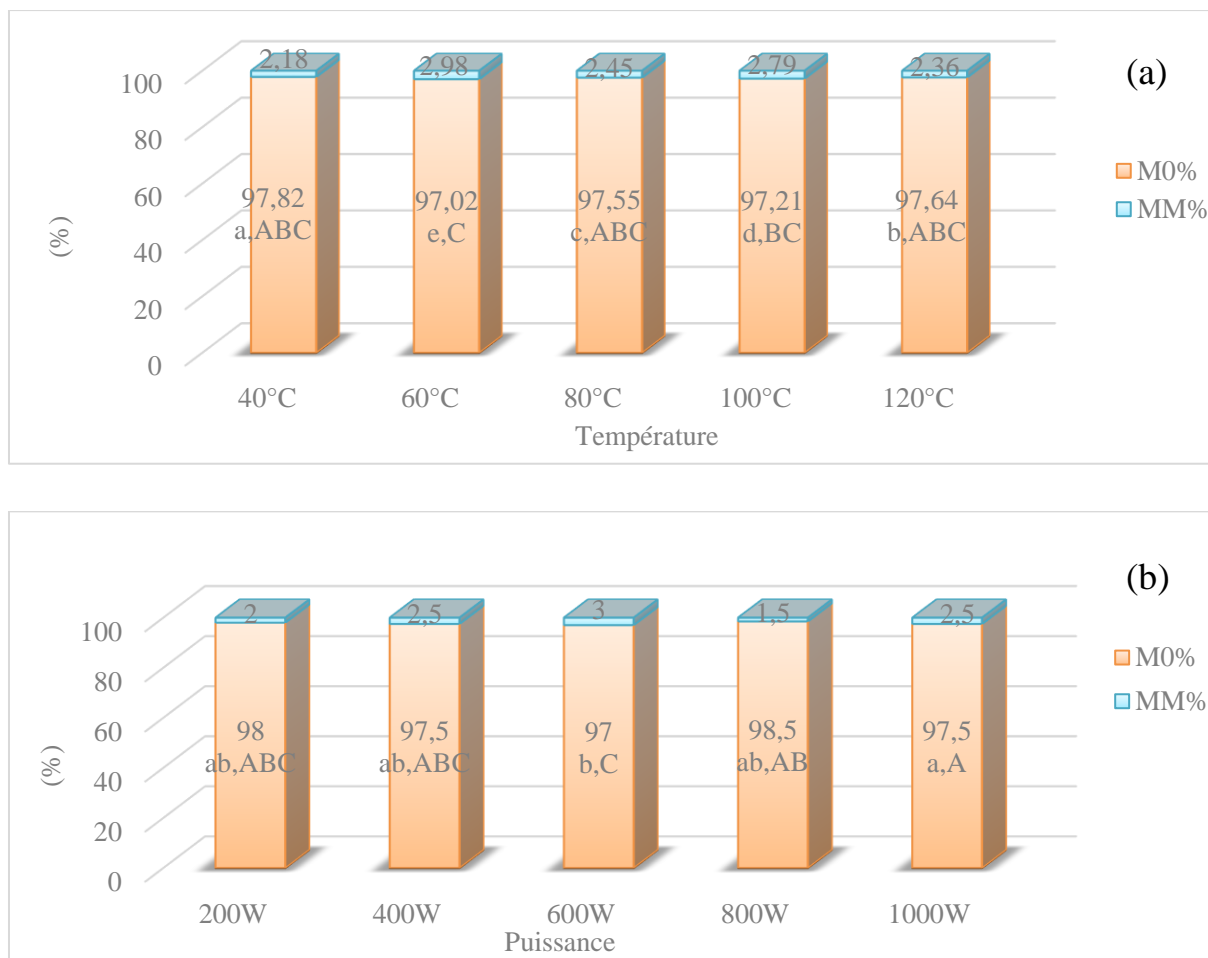


Figure 24. Taux de matière minérale et de matière organique des poudres d'orange sanguine.
(a) Séchage par convection, (b) séchage par micro-ondes.

Le taux de cendres représente la quantité en minéraux présents dans l'échantillon et qui varie de 2,18 % (40 °C) à 2,93 % (60 °C) pour le séchage convectif et de 1,5 % (800 W) à 3 % (600W) pour le séchage micro-ondes.

Il a été constaté que la richesse des plantes en minéraux dépend de la composition du sol et de la richesse de l'eau d'irrigation en matière minérale.

I.3 Acide ascorbique

Les résultats du dosage de l'acide ascorbique (Figure 25), pour les différentes poudres d'orange sanguine séchée par les deux méthodes de séchage, sont exprimés en Equivalent mg d'acide ascorbique par g de matière sèche (mg Eq AA/g MS).

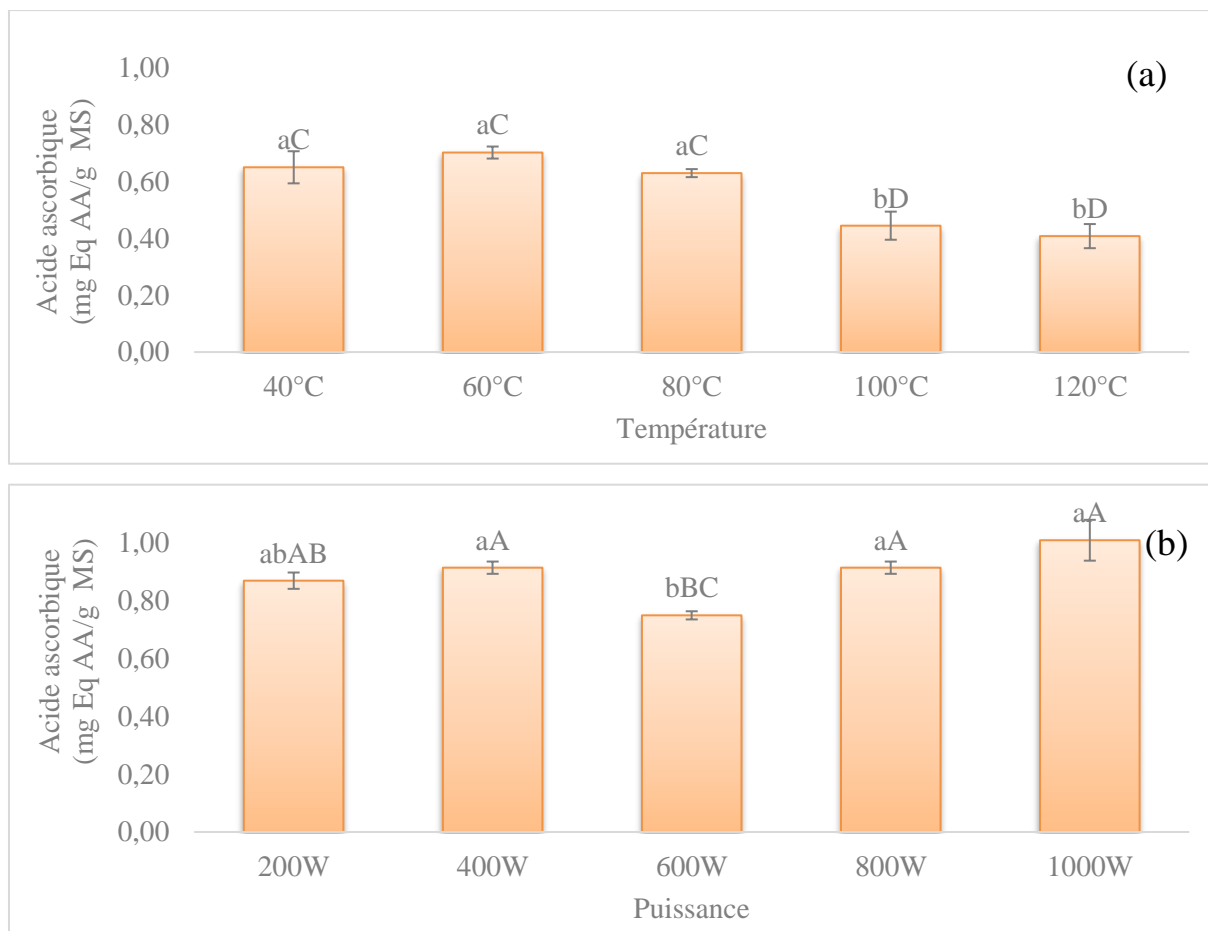


Figure 25. Teneur des poudres d'orange sanguine en acide ascorbique.

(a) séchage par convection et (b) séchage par micro-ondes.

Les poudres d'orange sanguine séchée par micro-onde à 1000 W, ont donné la teneur la plus importante en acide ascorbique (0,92 mg Eq AA/g de MS), alors que le séchage à l'étuve a montré une teneur maximale à 60 °C (0,70 mg Eq AA/g de MS), mais qui reste inférieure et statistiquement différente de celle obtenue par le séchage micro-ondes. Autrement dit, le séchage microonde conserve mieux l'acide ascorbique que l'étuve. Cette faible teneur en acide ascorbique obtenue par le séchage à l'étuve, peut s'expliquer par le temps d'exposition relativement très long par rapport à celui par micro-ondes. En revanche, le séchage par convection à 100 et 120 °C, définies comme les températures les plus élevées dans cette étude, ont eu un effet négatif sur la concentration en vitamine C des tranches d'orange, et qui est extrêmement sensible à la chaleur.

Kaya, Aydın, and Kolaylı (2010) ont démontré qu'avec l'élévation des températures et la diminution de l'humidité relative, la dégradation de la vitamine C augmente dans le produit.

Une observation de tendance et de teneur similaire a été rapporté par I. Alibas and Yilmaz (2021) et Bozkir (2020) lors du séchage de l'orange en appliquant les mêmes procédés.

Néanmoins comparé à l'échantillon frais ayant une teneur en vitamine C de 3,03 mg Eq AA/g de MS, une dégradation a été noté en appliquant les deux procédés.

I.4 Caroténoïdes

La comparaison entre les teneurs en β -carotène à différents traitements de séchage, exprimée en Equivalent $\mu\text{g } \beta$ - carotène par g de matière sèche ($\mu\text{g Eq } \beta\text{C /g MS}$) est présentée dans la figure 26.

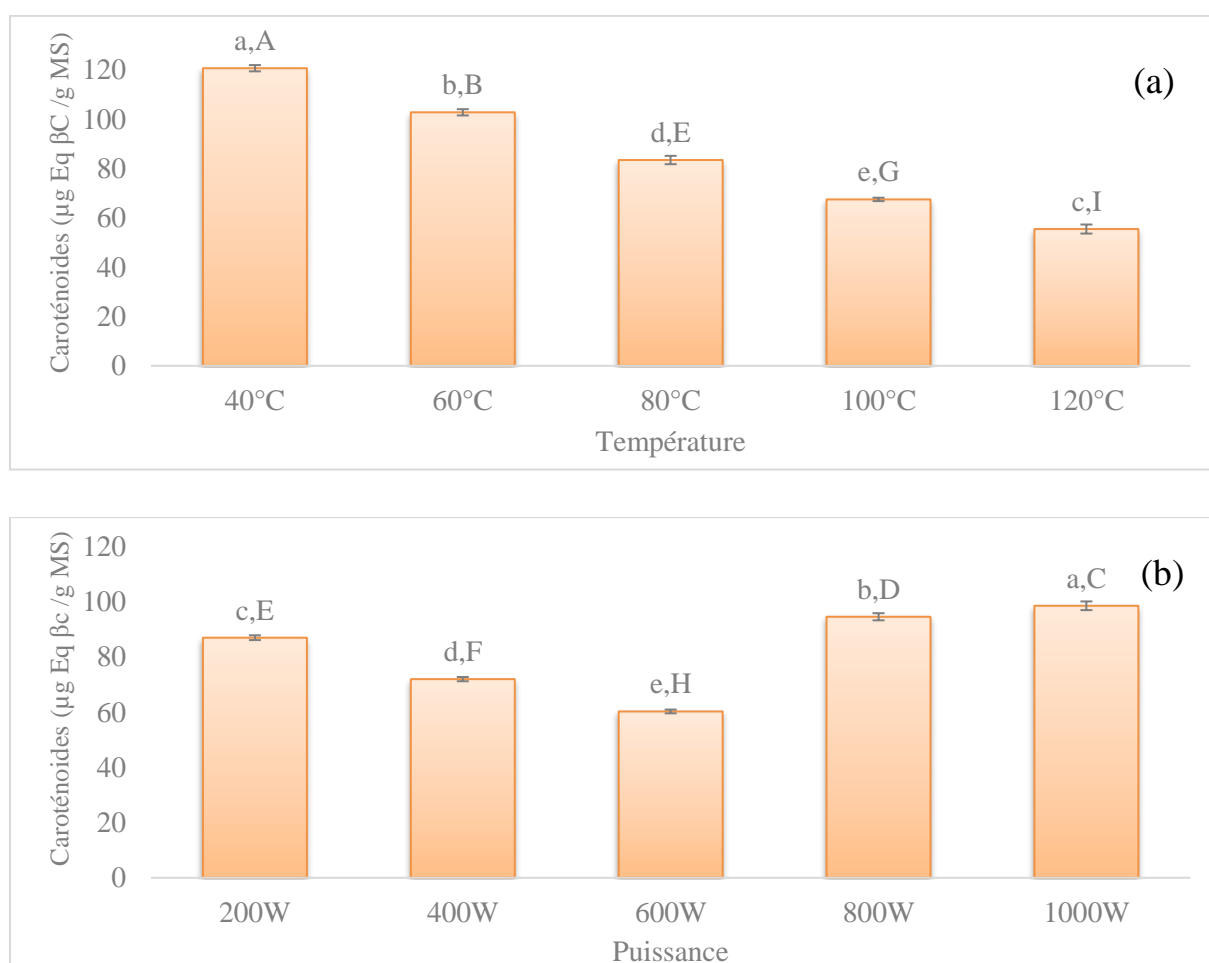


Figure 26. Teneur des poudres d'orange sanguine en caroténoïdes (a) séchage par convection et (b) séchage par micro-ondes.

La teneur des β -carotène de *Citrus Sinensis [L.] Osbeck* à l'état frais est de $124 \mu\text{g Eq } \beta\text{C /g MS}$. Des pertes ont été signalées lors du séchage avec les deux procédés. En effet, les teneurs en caroténoïdes varient de $55,5 \pm 1,83 \mu\text{g Eq } \beta\text{C /g MS}$ à $120,75 \pm 1,27 \mu\text{g Eq } \beta\text{C /g MS}$ pour le séchage à l'étuve et de $60,27 \pm 0,68 \mu\text{g Eq } \beta\text{C /g MS}$ à $98,58 \pm 1,57 \mu\text{g Eq } \beta\text{C /g MS}$ pour le

séchage micro-ondes. Une différence significative entre toutes les poudres séchées a été relevée à l'exception des poudres séchées à 80 °C et 200 W qui ne présentaient pas de différence $83,50 \pm 1,69 \mu\text{g Eq } \beta\text{C /g MS}$ et $87,01 \pm 0,87 \mu\text{g Eq } \beta\text{C /g MS}$, respectivement.

Les résultats obtenus ont démontré que les valeurs de β -carotène étaient inversement liées à la température de séchage appliquée. La poudre d'orange sanguine séchée à 40 °C a montré de manière très significative ($p \leq 0,05$) la teneur la plus élevée en β -carotène ($120,75 \pm 1,27 \mu\text{g Eq } \beta\text{C /g MS}$), qui a diminué constamment en augmentant la température de séchage de sorte qu'à 120 °C elle atteint la valeur la plus basse ($55,5 \pm 1,83 \mu\text{g Eq } \beta\text{C /g MS}$). Ces résultats sont en harmonie avec ceux de Stéphane Georgé et al. (2011), Arkoub-Djermoune et al. (2016), Lu, Peng, Zhu, and Pan (2018) et Cherrat, Boulkebatche-Makhlouf, Zeghichi, and Walker (2020) qui ont élucidé qu'il existe une relation inverse entre la quantité de β -carotène et le traitement à haute température, la lumière et la période de stockage. Ces facteurs peuvent provoquer l'isomérisation et l'oxydation du β -carotène, suivies d'un clivage dû à sa structure insaturée.

Une tendance de diminution de la quantité des β -carotènes a été remarquée avec l'augmentation des puissances, à l'exception des échantillons séchés à 1000 et 800 W, qui ont donné lieu aux plus grandes teneurs pour le procédé micro-ondes avec $98,58 \pm 1,57$ et $94,59 \pm 1,28 \mu\text{g Eq } \beta\text{C /g MS}$, respectivement, cela est probablement dû au temps de séchage impliqué pour ces deux puissances et qui est le plus court.

I.5 Fonction et liaisons chimiques

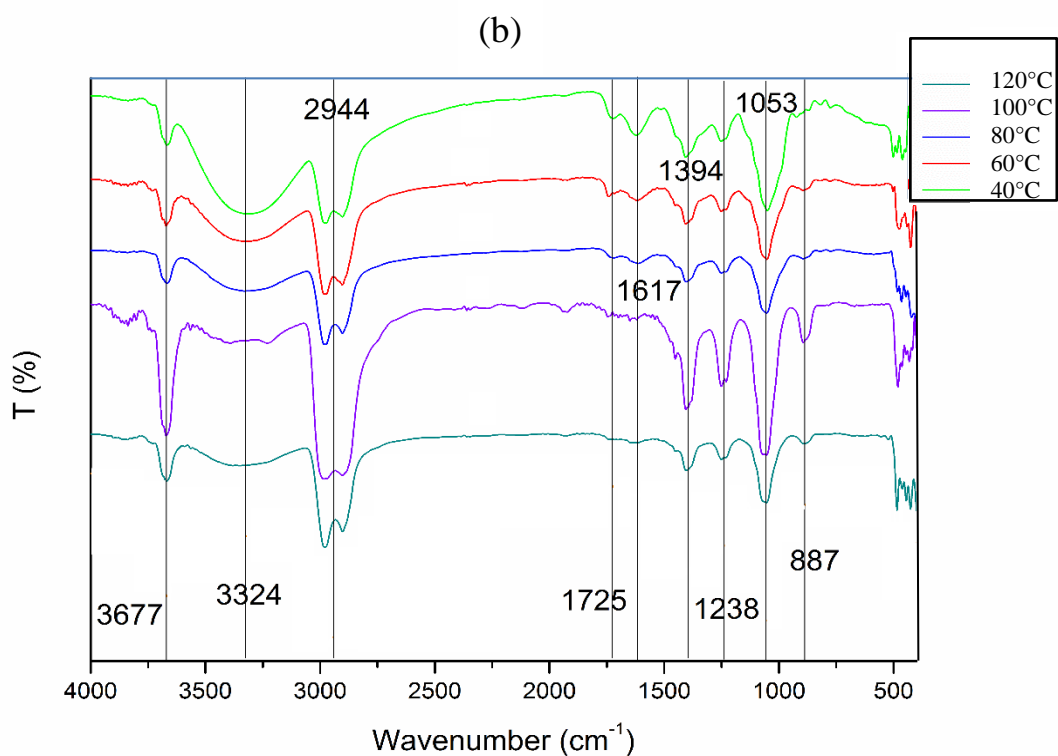
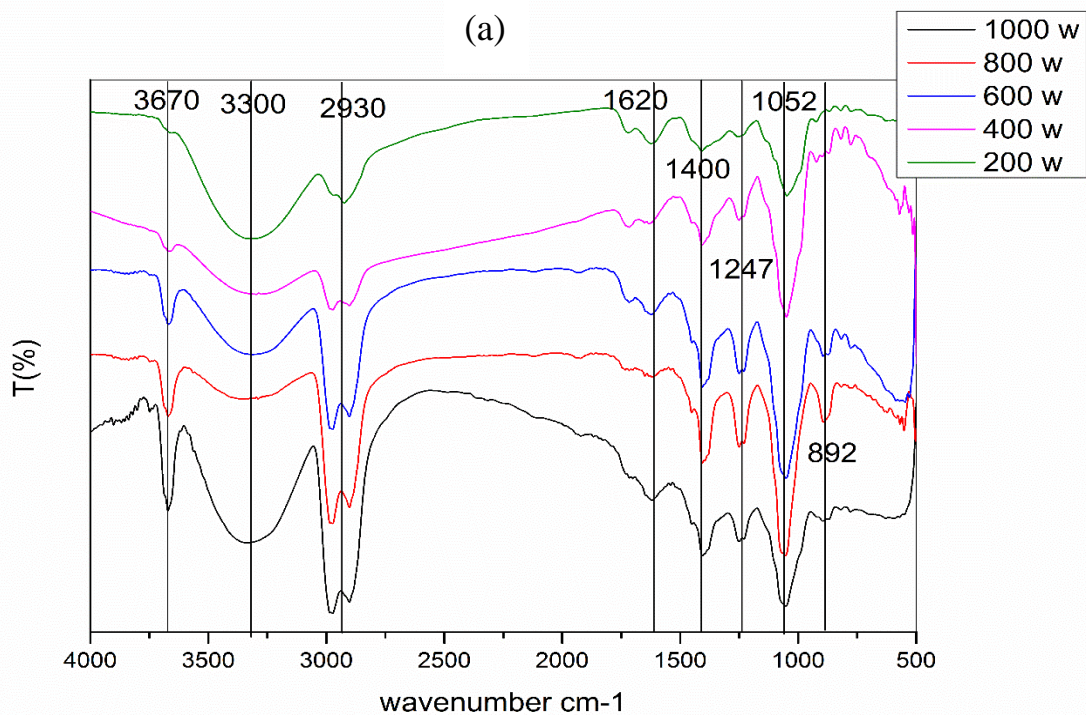


Figure 27 Spectre FT-IR des poudres d'oranges

(a) séchage par convection et (b) séchage par micro-ondes.

Le spectre FT-IR a été utilisé pour identifier l'effet du séchage conventionnel et innovant sur les groupements fonctionnels des composants actifs présents dans les poudres séchées sur la base des valeurs des pics dans la région du rayonnement Infrarouge.

L'analyse des spectres FT-IR a mis en évidence que les bandes caractérisantes de la structure des poudres de *Citrus sinensis* [L.] Osbeck séchées ne présentaient pas de différences qualitatives, mais que leurs intensités d'absorption relative variaient en fonction des températures et des puissances de séchage.

En effet, la Figure 30 démontrent que le traitement aux micro-ondes n'altère pas et ne modifie pas la distribution des groupements fonctionnels. Les spectres des différentes fractions obtenues avec différentes températures de séchage montrent un aspect très similaire.

Dans le domaine $3834 - 3400 \text{ cm}^{-1}$, un pic qui apparaît à 3677 cm^{-1} est principalement due à la vibration des groupements O-H libre (Sugumaran, Susan, Ravichandran, Seshadri, & Environment, 2012), dont l'intensité est plus importante pour l'échantillon séché à 100°C et 1000 W pour l'étuve et le micro-onde respectivement, et l'intensité la plus faible est remarqué pour les échantillons séchés à 200 et 400 W . Une large bande de transmission à 3300 cm^{-1} dont les intensités les plus élevées ont été enregistrées pour les échantillons séchés aux puissances 200 et 1000 W du micro-onde et la température 40°C de l'étuve, correspondantes à la fréquence d'étirement du groupe O-H est dû aux réactions intra et inters moléculaires. Le pic observé dans la région 2944 cm^{-1} est dû à l'étirement du groupe -C-H (alcane) (Rathinavel & Saravanakumar, 2021) dont les intensités augmentent avec l'augmentation des températures et puissances. Le séchage par micro-onde, a enregistré les meilleures valeurs (à 800 et 1000 W) ainsi que les plus faibles (à 400 et 200 W) pour les deux techniques utilisées.

Un pic à 1725 cm^{-1} est seulement observé dans les extraits séchés par l'étuve dont l'intensité diminue avec l'augmentation de la température de séchage correspondant au groupe C=O (groupement carboxyles et cétones) (Mierzwa-Hersztek et al., 2019). Dans le domaine $1625 - 1685 \text{ cm}^{-1}$, un pic à 1620 cm^{-1} correspondant aux vibrations d'élongation du groupe C=C aromatique est observé. Des pics observés aussi à 1400 (l'échantillon séché à 100°C donne l'intensité la plus importante), 1240 et 1053 cm^{-1} (la transmission la plus faible observée pour les poudres séchées à 200 W et à 120°C) correspondant au flexion C-H, vibrations d'étirement C-O- dû à la présence d'acides carboxyliques et la vibration d'élongation symétrique du -OH phénolique, respectivement. En outre le pic de la région à 887 cm^{-1} indique l'unité de sucre par liaisons glycosidiques (MUHSEN, ALI, & MALK, 2022; Rathinavel & Saravanakumar, 2021).

Les résultats de l'analyse FT-IR ont confirmé la présence d'alcool, de phénol, d'alcane, d'aldéhyde et de composés aromatiques. Les paramètres de séchages n'ont pas affecté les groupements fonctionnels présents dans les échantillons qualitativement, mais des différences quantitatives ont été observées.

I.6. Composés phénoliques

I.6.1 Rendement d'extraction

Les rendements d'extraction des polyphénols totaux illustrés dans la figure 28 montre une variation de $24,45 \% \pm 0,07$ à $36,65 \% \pm 0,35$ pour le séchage convectif, et de $48,85 \pm 0,07$ à $69,75 \% \pm 0,21$ pour le séchage micro-ondes.

Un pourcentage de 53,2% a été enregistré pour le rendement d'extraction de l'orange sanguine fraîche.

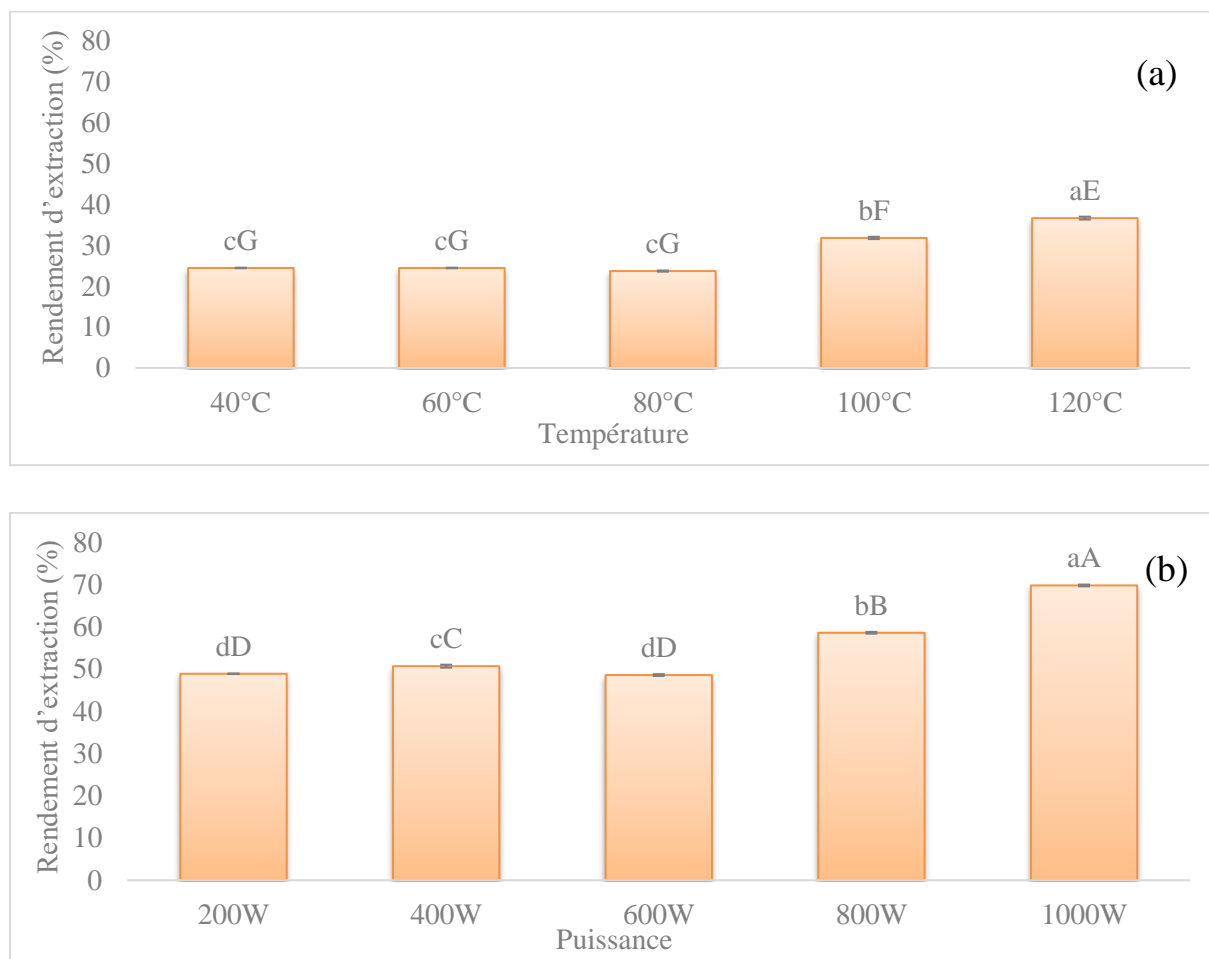


Figure 28. Rendement d'extraction des composés phénoliques.

(a) Séchage par convection et (b) séchage par micro-ondes

D'après ces résultats, il s'avère que le rendement augmente avec augmentation de la température et de la puissance, néanmoins les meilleurs rendements de cette extraction ont été attribués clairement au séchage par micro-onde ($p \leq 0,05$).

I.6.2 Couleur des extraits polyphénoliques

La couleur est l'un des paramètres les plus importants pour l'évaluation de la qualité des produits alimentaires car elle influence l'acceptabilité par le consommateur (40 % du critère d'acceptabilité). L'indice de couleur (IC), le pourcentage des couleurs bleue, jaune et rouge, ainsi que la teinte des différents extraits d'orange sanguine séchée avec les différentes méthodes (étuve et micro-onde) sont illustrés dans le tableau X.

Tableau X. Teinte, indice de couleur et pourcentage de la couleur des extraits polyphénoliques des poudres de l'orange sanguine.

P (W)	Indice de couleur	Teinte	% du bleu	% du rouge	% du jaune
Frais	1,97±0,13	2,54±0,05	55.0 ± 0.16	31.4 ± 0.04	13.6 ± 0.04
200	1,68±0,07 ^{ab,AB}	2,19±0,05 ^{a,A}	55,05±1,42 ^{a,B}	23,63±0,35 ^{c,I}	20,32±1,62 ^{bc,H}
400	1,51±0,07 ^{bcd,CD}	1,9±0,11 ^{a,B}	51,38±1,30 ^{ab,F}	25,65±0,92 ^{b,F}	21,97±0,67 ^{b,D}
600	1,75±0,18 ^{a,A}	1,87±0,02 ^{a,B}	50,33±1,16 ^{c,G}	25,47±0,38 ^{b,G}	23,20±1,52 ^{a,C}
800	1,38±0,03 ^{cde,E}	1,87±0,02 ^{a,B}	51,44±0,56 ^{ab,F}	25,99±0,08 ^{b,E}	21,57±0,53 ^{b,F}
1000	1,68±0,03 ^{ab, AB}	1,73±0,05 ^{a,B}	49,76±0,5 ^{d, H}	28,37±0,16 ^{a,C}	21,72±0,43 ^{a,E}
T (°C)	Indice de couleur	Teinte	% du bleu	% du rouge	% du jaune
40	1,25±0,03 ^{c,F}	1,89±0,08 ^{c,B}	52,68±1,19 ^{b,C}	26,88±0,49 ^{b,D}	21,44±0,71 ^{bc,G}
60	1,67±0,03 ^{a,B}	1,53±0,01 ^{e,C}	44,89±0,24 ^{c,I}	29,07±0,11 ^{a,A}	26,03±0,16 ^{a,A}
80	1,12±0,2 ^{c,G}	2,15±0,06 ^{b,A}	52,23±1,40 ^{b,D}	24,19±1,42 ^{c,H}	23,58±2,82 ^{b,B}
100	1,47±0,02 ^{b,DE}	2,35±0,09 ^{a,A}	58,40±0,39 ^{a,A}	24,23±0,10 ^{c,H}	17,37±0,30 ^{d,J}
120	1,65±0,03 ^{a,BC}	1,79±0,02 ^{d,B}	52,00±1,34 ^{b,E}	28,61±1,05 ^{a,B}	19,39±2,37 ^{c,I}

Les échantillons d'orange séchés ont révélé une variation de couleur significative. Le pourcentage des couleurs bleue, rouge et jaune pour les deux méthodes de séchages, varie de 50,33 % à 58,40 % ; 23,63 % à 29,07 % et de 17,37 % à 26,03 %, respectivement.

Selon Kelebek et al. (2008), les teneurs de l'indice de couleur de l'orange sanguine Turque est de $1,4 \pm 0,12$, cette valeur concorde avec les valeurs trouvées dans la présente étude ($1,12 \pm 0,02$ à $1,81 \pm 0,03$). Par contre, les valeurs de la teinte de l'orange Turque ($0,59 \pm 0,01$) sont

inférieures à son homologue Algérienne ($1,53 \pm 0,01$ à $2,35 \pm 0,03$). En plus, les pourcentages de la couleur bleue et jaune de cette étude sont supérieurs à ceux rapportés par Kelebek et al. (2008) ($32,6 \% \pm 0,04$ et $12,4 \% \pm 0,04$, respectivement). Par contre, le pourcentage de la couleur rouge rapporté par le même auteur est de $55 \% \pm 0,16$ et qui est supérieur à celui de la présente étude.

Ces différences signalées en valeur peuvent être dû à de nombreux facteurs : la région géographique, le procédé de séchage appliqué et la variété et l'état de la maturité des fruits.

I.6.3 Indice des polyphénols

L'indice de polyphénols des extraits de poudres de l'orange séchée sont présentés dans la figure 29.

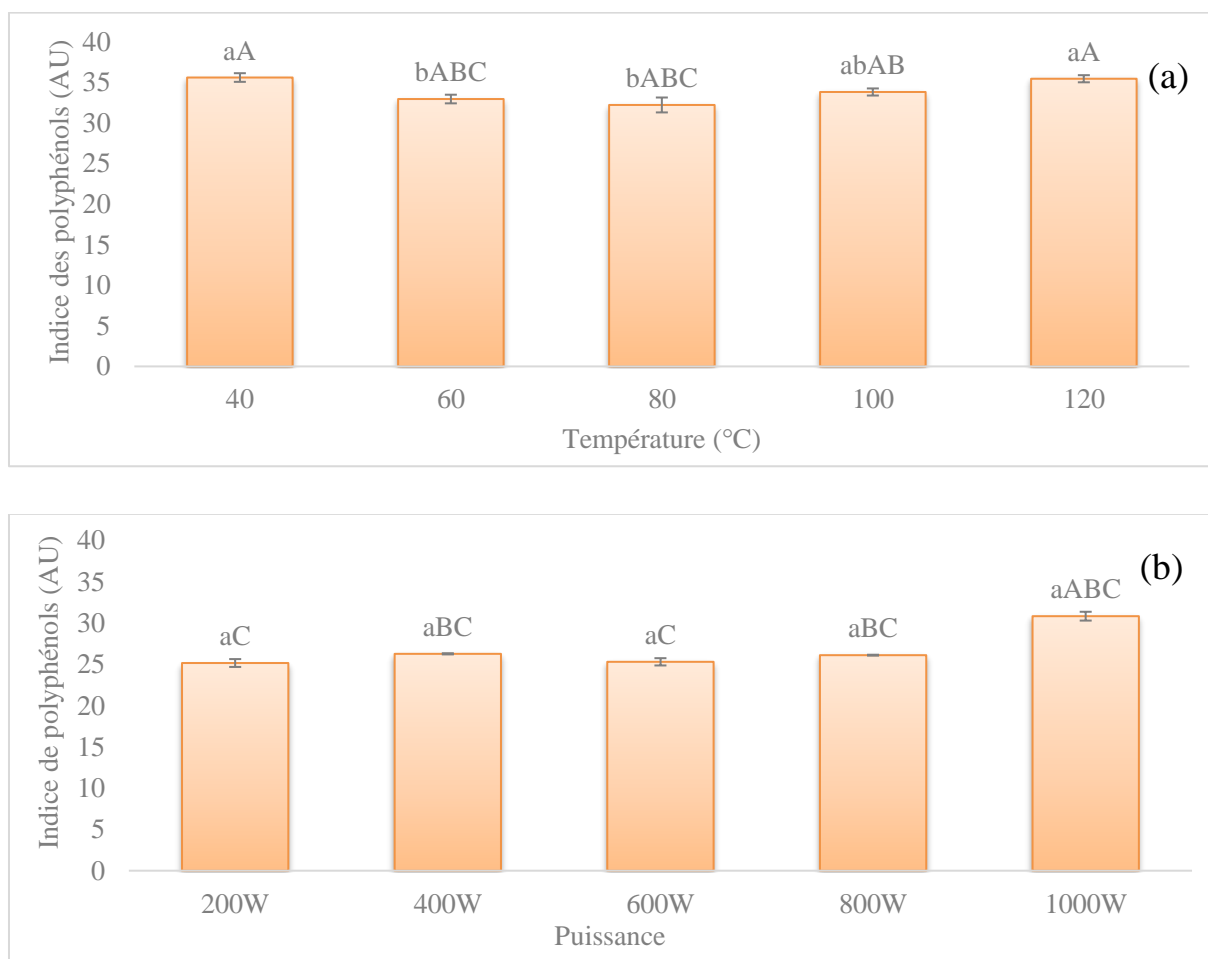


Figure 29. L'indice de polyphénols des extraits d'orange sanguine

(a) Séchage par convection et (b) séchage par micro-ondes

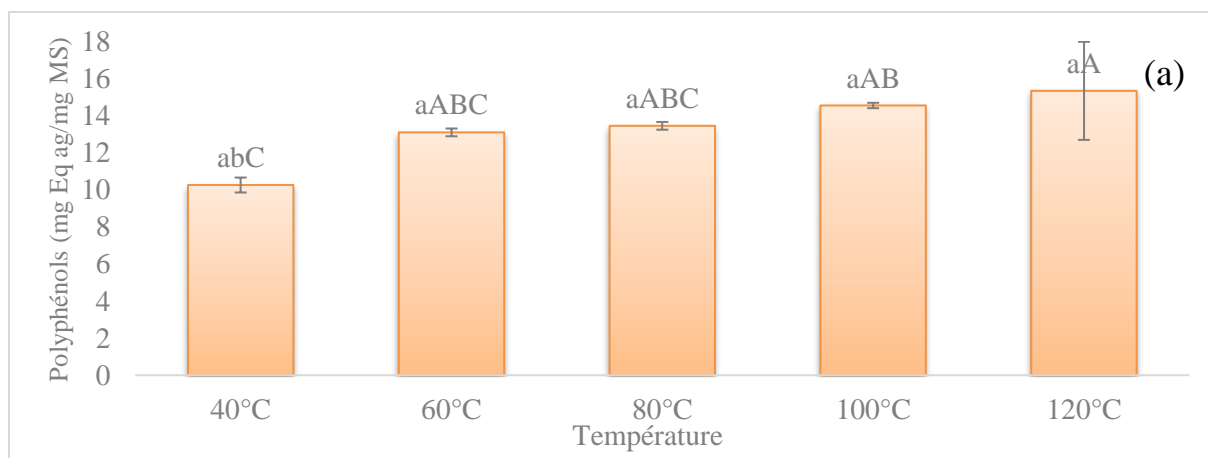
L'indice de polyphénols de poudres d'orange sanguine séchée à l'étuve varie de $32,05 \pm 0,91$ UA à $35,61 \pm 0,53$ UA. En effet, le séchage à 40°C présente la valeur d'indice de polyphénol la plus élevée ($35,61 \pm 0,53$ UA), suivi par celle enregistrée à 120°C et à 100°C avec des valeurs de $35,46 \pm 0,44$ UA et $33,83 \pm 0,43$ UA, respectivement dont aucune signification statistique n'a été signalé. Par contre, le séchage à 80°C présente la plus faible valeur avec un indice de polyphénols de $32,23 \pm 0,91$ UA. Cela peut être expliqué par la dégradation des polyphénols au cours de séchage, par le temps de séjour, et le ou le type de polyphénols présents dans les extraits.

L'indice des polyphénols des poudres séchées par micro-ondes varie de $25,16 \pm 0,47$ AU à $30,84 \pm 0,53$ AU. L'analyse statistique n'a pas dévoilé de différences significatives entre les différents échantillons séchés par ce procédé.

Les résultats de l'indice des polyphénols ($55,4 \pm 0,50$ UA) de l'orange Moro (variété Turque) et $28 \pm 0,20$ de l'orange Sanguinello rapportés par Kelebek et al. (2008), sont supérieurs à ceux obtenus dans la présente étude. Cette différence peut être dues à la dégradation des composés phénoliques lors du séchages, la répartition géographique, les conditions climatiques et les conditions de stockage.

I.6.4 Polyphénols totaux

Le traitement thermique est l'un des nombreux facteurs qui peuvent influencer le contenu phénolique des fruits et légumes (Arkoub-Djermoune et al., 2016). Par conséquent, l'étude actuelle a examiné l'effet de deux processus de séchage sur les teneurs en composés phénoliques totaux, exprimés en mg équivalent acide gallique par g de matière sèches (figure 30).



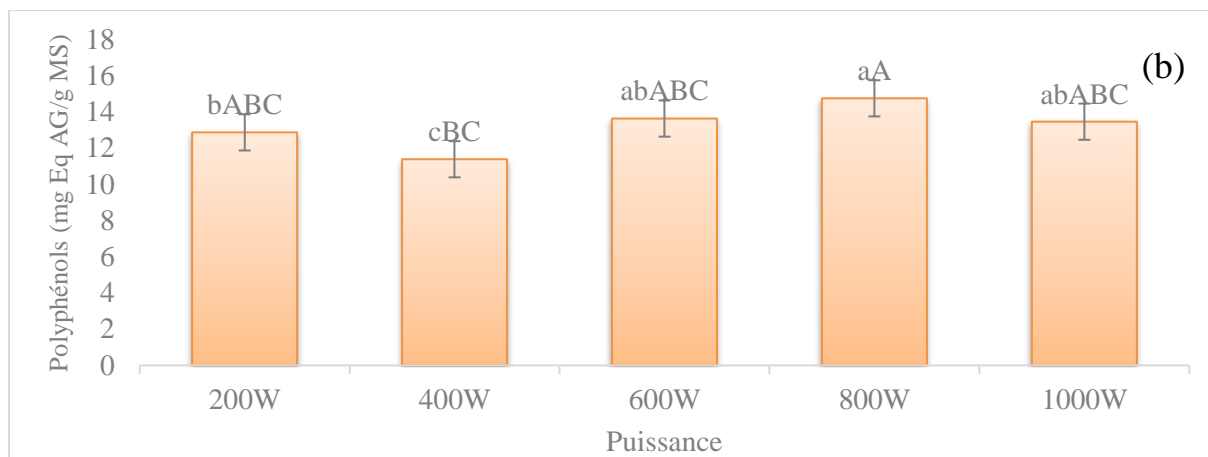


Figure 30. Teneurs des extraits d'orange sanguine séchés en polyphénols.

(a) Séchage par convection et (b) séchage par micro-ondes.

La figure 30 montre que les polyphénols totaux varient de $10,25 \pm 0,40$ à $15,33 \pm 2,64$ mg Eq AG/g MS lors du séchage à l'étuve et qui augmente avec l'augmentation des températures mais qui ne présente pas des différences significatives entre elles. Cherrat et al. (2020) ont rapporté la même constatation lors du séchage de gingembre.

Des résultats semblables ont été noté dans des études précédentes (Nguyen, 2015; Vega-Gálvez et al., 2009). Cette augmentation pourrait être attribuée à la formation de produits de la réaction de Maillard qui conduisent à la formation de composés phénoliques nouveaux à haute température (Que, Mao, Fang, & Wu, 2008) puisqu'il a été signalé que la température, le temps de séchage et le pH des matériaux dans des conditions simulées sont considérés comme des conditions optimales pour la réaction de Maillard pendant le séchage et le traitement (M. Li et al., 2020). En outre, nous pouvons supposer que les composés phénoliques à un poids moléculaire plus élevé qui sont présents dans l'orange peuvent être libérés sous des formes libres simples par le traitement thermique, cela augmente ainsi la quantité des polyphénols dans les échantillons (Bushra, 2012).

Les faibles teneurs en composés phénoliques à 40°C peuvent être expliquer par sa dénaturation suite à une longue exposition à cette température à l'étuve (Klimczak, Małecka, Szlachta, & Gliszczyńska-Świąło, 2007).

Les concentrations en composés phénoliques totaux dans l'orange Moro sont proches de ceux rapportés par Lagha-Benamrouche and Madani (2013) ($14,95$ mg Eq AG/g MS), moins importantes que celle rapporté par Stephane Georgé, Brat, Alter, and Amiot (2005) ($19,1$ mg

Eq AG/g MS) et supérieure de celle de Bozkir (2020) lors du séchage convectif des tranches d'orange (1 mg Eq AG/g MS).

Le dosage des composés phénoliques des poudres issues du séchage par micro-ondes montre que les teneurs varient de $11,39 \pm 0,42$ à $14,75 \pm 0,21$ mg Eq AG/g MS. Nous constatons que la valeur la plus élevée est de $14,75 \pm 0,21$ mg Eq AG/g MS qui est attribuée à la puissance 800 W, cette dernière n'était pas différente statistiquement de 600 et 1000 W, mais nettement différente de 200 et 400 W, bien que des fluctuations sont observées.

L'effet du séchage par micro-ondes sur les substances phénoliques des fruits et légumes a été étudié, certains auteurs ont remarqué la présence d'effet sur les composés phénoliques (Akyıldız et al., 2004) et d'autres ont exprimé qu'il n'y a pas eu présence (Dewanto et al., 2002).

Les teneurs élevées suivant les puissances élevées peuvent s'expliquer par la chaleur intense générée par les micro-ondes, qui crée une pression de vapeur et une température élevée à l'intérieur des tissus végétaux, qui augmentent avec l'augmentation de la puissance des micro-ondes, ce qui perturbe les polymères des parois cellulaires des plantes. En conséquence, les composés phénoliques de la paroi cellulaire ou les composés phénoliques liés peuvent être libérés, ce qui entraîne l'extraction de plus de composés phénoliques (Bettaieb Rebey et al., 2012; Inchuen, Narkruga, & Pornchaloempong, 2010).

Des résultats similaires ont été rapportés par Kubra and Jagan Mohan Rao (2012) pour le gingembre et par Nazmi IZLI (2017) pour la mangue.

Les tranches d'orange séchées ont eu une perte en contenu phénolique total par rapport aux tranches d'orange fraîches ($28,72 \pm 2,82$ mg Eq AG/g MS) de 46,63 % à 64,32 %, et de 48,65 à 60,34 % pour l'étuve et le micro-onde, respectivement.

En comparons les deux types de séchage, nous remarquons que le séchage par étuve permet une meilleure conservation des polyphénols totaux que le micro-onde. Toutefois, cette différence n'était pas aussi significative pour les températures et les puissances élevées. Une tendance inverse a été constaté par Bozkir (2020) où les contenus phénoliques totaux des tranches d'orange séchées diminuaient à cause de l'augmentation de la température pendant le séchage convectif et le micro-onde sous vide, et que le microonde donnait des teneurs supérieures que celles du séchage à l'étuve. Une explication possible de ce résultat est que le phénomène de chauffage très rapide du séchage par micro-ondes désactive les polyphénols

oxydases plus rapidement que le séchage convectif, retardant ainsi la détérioration enzymatique des polyphénols (Sarkar, Salauddin, Hazra, & Chakraborty, 2020).

I.6.5 Flavonoïdes

Les résultats de la teneur des extraits de l'orange sanguine séchées à différentes méthodes en flavonoïdes sont exprimés en mg équivalent quercétine/g de matière sèche (figure 31).

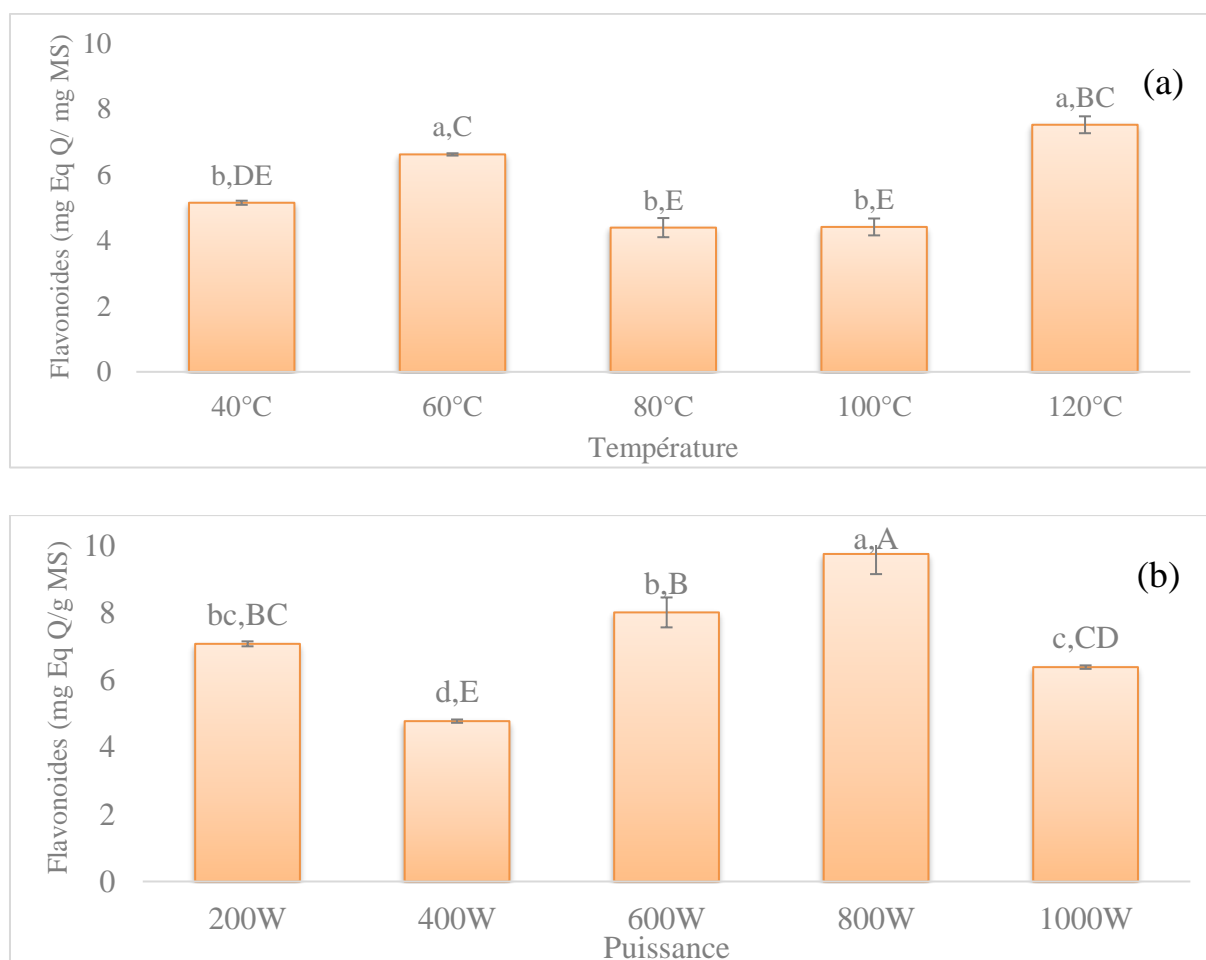


Figure 31. Teneurs des extraits d'orange sanguine séchés en flavonoïdes.

(a) Séchage par convection et (b) séchage par micro-ondes.

La teneur en flavonoïdes totaux de l'orange sanguine à l'état frais était de $24,41 \pm 0,43$ mg Eq Q /g MS.

Les flavonoïdes totaux des poudres séchées par étuve ont présenté une tendance proche de celle des polyphénols totaux. Comme montré par les données, la teneur la plus élevée ($7,52 \pm 0,25$ mg Eq Q /g MS) a été observée dans la poudre séchée à 120 °C (la température la plus élevée). Cette quantité a diminué à $5,148 \pm 0,06$ mg Eq Q /g MS pour les poudres séchées à 40 °C, et

une perte supplémentaire de flavonoïdes totaux a été remarquée à 80 °C (mg Eq Q /g MS à $4,39 \pm 0,29$). Nos résultats sont en accord avec ceux de Cherrat et al. (2020), Panche, Diwan, and Chandra (2016) et Schieber, Keller, and Carle (2001) qui ont rapporté qu'une longue durée d'extraction et une température élevée pendant le processus de séchage sont parmi les facteurs cruciaux qui influencent la teneur en flavonoïdes. Les températures de séchage élevées contribuent à la destruction des constituants cellulaires, qui libèrent les flavonoïdes et les rendent disponibles lors de l'extraction. En revanche, un temps d'exposition court pendant le processus de séchage le rend avantageux en termes de préservation des flavonoïdes.

La teneur en flavonoïdes totaux des poudres séchées par micro-onde a montré une tendance similaire que celle des polyphénols totaux. En effet, les flavonoïdes représentent la fraction majoritaire des composés phénolique de l'orange sanguine (84,85% dans notre étude).

Les teneurs en Flavonoides varient de $9,79 \pm 0,34$ à $9,79 \pm 0,34$ mg Eq Q /g MS. Une différence significative ($p \leq 0,05$) entre toutes les poudres séchées a été relevé à l'exception des poudres de 200 W et 1000 W.

Il est à noter que les effets de la puissance de sortie du micro-onde sont variables suivant le type de flavonoïde majoritaire dans la matrice, cette hypothèse est affirmée par Vian, Maingonnat, and Chemat (2009).

La comparaison entre les deux types de séchage en termes de teneurs en flavonoïdes, révèle que le séchage par micro-ondes a donné des teneurs en flavonoïdes légèrement plus élevées par rapport à celles obtenue par étuve. Cette comparaison concordes avec les résultats de l'étude de Jaiswal and Abu-Ghannam (2013).

I.6.6 Anthocyanes

Les résultats de l'effet du séchage sur la contenance en anthocyanes obtenus pour les extraits des poudres *Citrus sinensis* [L.] Osbeck, sont exprimés en mg équivalent cyanidine-3-glucoside/g de matière sèche (MS) sur la figure 32.

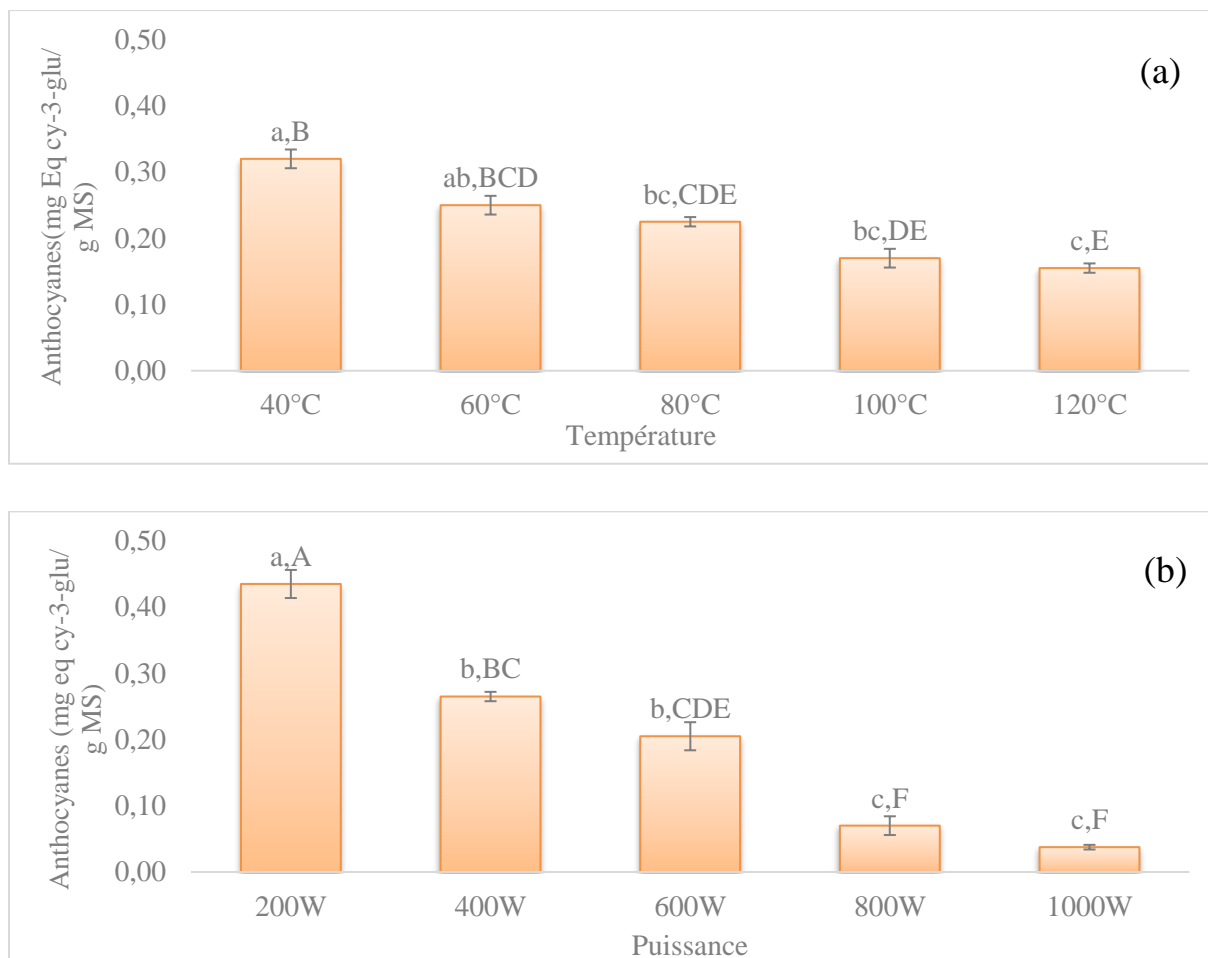


Figure 32. Teneur d'orange sanguine en anthocyanes.

(a) Séchage par convection et (b) séchage par micro-ondes.

La teneur en anthocyanes des oranges fraîches est de 1,08 mg Eq cy-3-glu/g MS. Les conséquences des modalités de séchage sur la dégradation des anthocyanes sont représentées sur la figure 32. Comme la figure le signale, la dégradation des anthocyanes est considérablement affectée par les conditions de séchage avec l'augmentation des températures et des puissances.

La teneur en anthocyanes la plus élevée pour le séchage convectif a été observée à une température de 40 °C (0,32 mg Eq cy-3-glu/g MS), tandis qu'elle diminue jusqu'à atteindre 0,16 mg Eq cy-3-glu/g MS à 120 °C.

Lors du séchage micro-ondes, les teneurs en anthocyanes varient de 0,04 à 1000 W jusqu'à 0,44 mg Eq cy-3-glu/g MS au séchage à 200 W.

En comparant les deux techniques statistiquement beaucoup de chevauchements ont été observés, la puissance de 200 W du micro-onde a donné le résultat le plus élevé et statistiquement différents de ceux à 400 W, 40 °C et 60 °C. Les températures à 60 et 80 °C n'ont pas montré de différences significatives avec 400 et 600 W. Cependant, les puissances les plus élevées à savoir 800 et 1000 W ont causé la plus grande dégradation des anthocyanes ($p \leq 0,05$).

Des comportements similaires ont été rapportés pour différents fruits par (Lo Piero, 2015; Lo Scalzo, Iannocari, Summa, Morelli, & Rapisarda, 2004; M'hiri, Ioannou, Ghoul, & Mihoubi Boudhrioua, 2016)

Cette diminution en teneur des anthocyanes peut être due à la dégradation des anthocyanes par les températures élevées, et le temps de séchage qui est relativement long, vu leurs sensibilité à la chaleur (M'hiri et al., 2016).

De nombreux facteurs physiques et chimiques affectent la stabilité des anthocyanes, notamment le pH, la température, les enzymes, la présence d'oxygène et de co-pigments, les ions métalliques, l'acide ascorbique, le dioxyde de soufre, les sucres et les produits de dégradation des sucres (Lo Piero, 2015). Ce dernier a récapitulé les résultats des études mené sur la dégradation thermique de la cyanidine 3-(6"-malonyl) glucoside et de la cyanidine 3-glucoside, qui sont les deux principaux anthocyanes de l'orange sanguine, ainsi que des pyranoanthocyanes dérivées de la cyanidine-3-glucoside, indiquant que la cyanidine-3-(6'-malonyl) -glucoside est la plus stable. Inversement, les pyranoanthocyanines dérivées de la cyanidine-3-glucoside ont exprimés les taux de dégradation les plus élevés, ce qui suggère que les anthocyanines acylées pourraient être des pigments très prometteurs contribuant à la couleur de différents produits en tant que molécules de couleur stables et intenses. Les principaux facteurs intrinsèques tels que l'acide ascorbique et les sucres accélèrent significativement la dégradation thermique des anthocyanes d'orange sanguine, tandis que les flavonoïdes ont un effet protecteur des anthocyanes contre la dégradation ; l'effet protecteur des flavonoïdes est plus important par rapport à l'effet négatif de l'acide ascorbique ou des sucres sur les anthocyanes.

I.6.7. Tannins condensés totaux

L'effet de la variation des températures et des puissances appliquées lors du séchage sur les tannins condensés, exprimée en milligrammes acide tannique par gramme de poudre séchées au four et au micro-ondes, est représenté dans la figure 33.

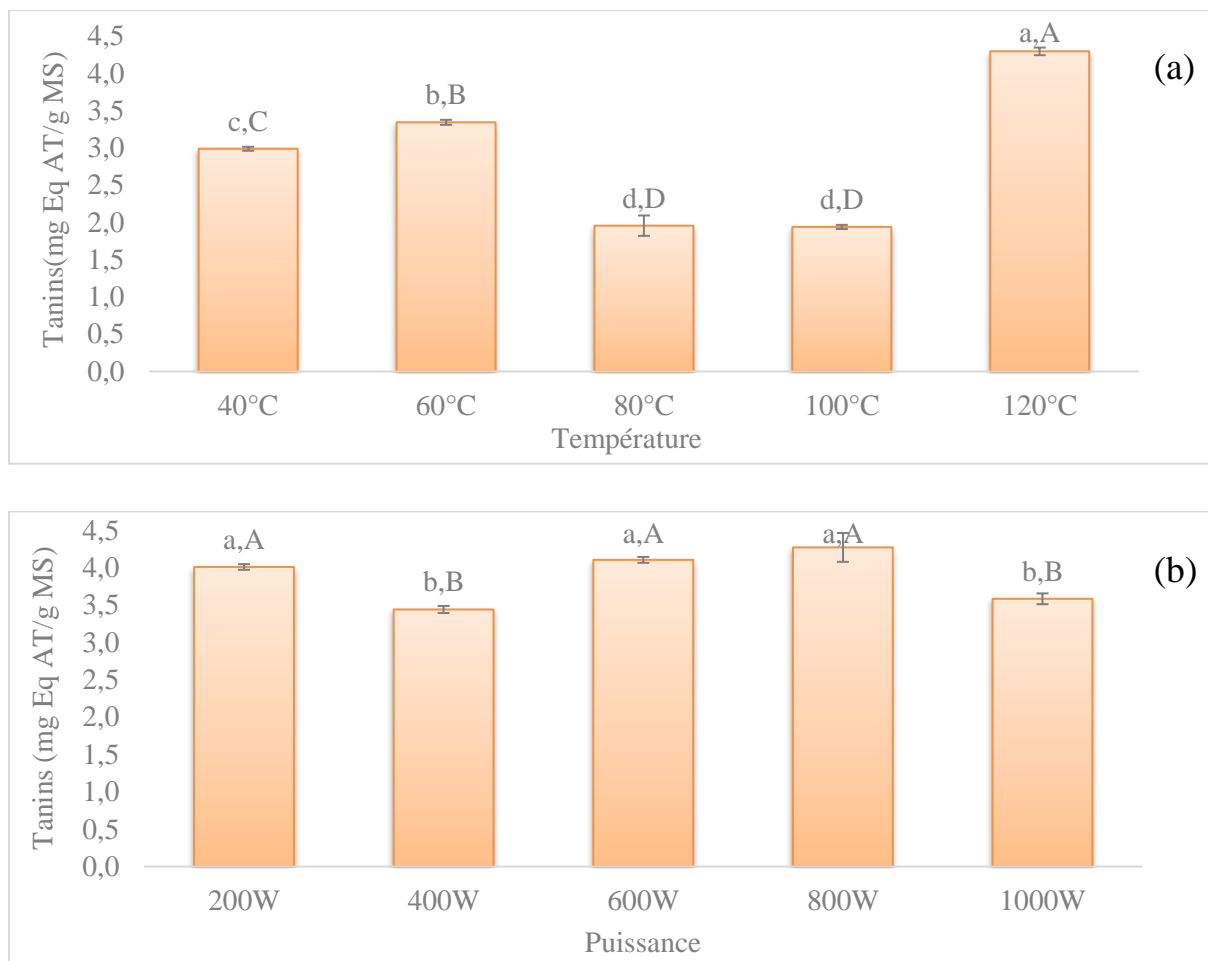


Figure 33. Teneur d'orange sanguine en tannins condensés.

(a) Séchage par convection et (b) séchage par micro-ondes.

Les teneurs en tannins condensés des poudres de *Citrus sinensis* [L.] Osbeck, ont présenté une tendance identique à celle des teneurs en flavonoïdes, que ça soit pour le séchage convectif ou le séchage micro-ondes.

Comme il a été constaté sur les histogrammes, la teneur la plus élevée ($4,30 \pm 0,05$ mg Eq AT /g MS) a été attribuée pour la température la plus élevée (120°C), suivie d'un $3,34 \pm 0,03$ mg Eq AT /g MS à 60°C , cependant la plus faible teneur en tannins condensés revient à la plus faible température (40°C) ($p \leq 0,05$). Alors que, les valeurs pour le séchage micro-ondes varient de $3,43 \pm 0,04$ à $4,27 \pm 0,19$ mg Eq AT /g MS.

Les résultats obtenus sont proches de ceux rapportés par (Lagha-Benamrouche & Madani, 2013) concernant les tanins hydrosolubles, condensés pour l'écorce de différentes variétés d'oranges : $4,48$ à $16,28$ mg Eq AT /g MS, $3,87$ à $6,43$ mg Eq AT /g MS et $4,96$ à $6,78$ mg Eq AT /g MS,

respectivement. Ainsi ces résultats concordent avec ceux de Julkunen-Tiitto and Sorsa (2001) où ils ont rapporté que le séchage à 60 °C a eu un effet de dégradation moins sévère sur les tanins condensés que le séchage à 90 °C par rapport à l'orange fraîche.

La comparaison des deux techniques de séchage, révèle que la technique micro-onde conserve les tannins condensés des poudres d'oranges séchées quel que soit la puissance mieux que la technique convective, seules les températures 120 °C et 60 °C de cette dernière ne montrent pas de différences significatives avec les valeurs par micro-ondes.

Selon Vitti et al. (2005) l'humidité joue un rôle important dans l'inactivation des tannins pendant le processus de séchage. La diminution des tannins dosables après le séchage peut être due à la complexation entre les tannins et les protéines, ainsi qu'à la polymérisation et à l'oxydation des tannins (Makkar, 2003; Salem, Nefzaoui, Salem, Ferchichi, & Tisserand, 1997).

II. Evaluation des activités biologiques

II.1 L'activité antioxydante des extraits éthanoliques

Plusieurs méthodes ont été développées pour mesurer l'efficacité des antioxydants alimentaires. Ces méthodes sont basées sur différents types de systèmes: piégeage des espèces réactives de l'oxygène, des radicaux hydroxyles, réduction des radicaux peroxydes lipidiques, inhibition de la peroxydation lipidique et chélation des ions métalliques (Achat et al., 2012).

L'activité antioxydante des extraits phénoliques des poudres de *Citrus sinensis* [L.] Osbeck a été déterminée par trois méthodes, (radical cationique ABTS^{•+}, le radical stable DPPH[•], et le pouvoir réducteur).

II.1.1 Activité antioxydant par le test ABTS^{•+}

L'effet du séchage sur l'inhibition du radical stable ABTS^{•+} exprimé en pourcentage est illustré dans la figure 34, et exprimé en IC₅₀ dans la figure 35.

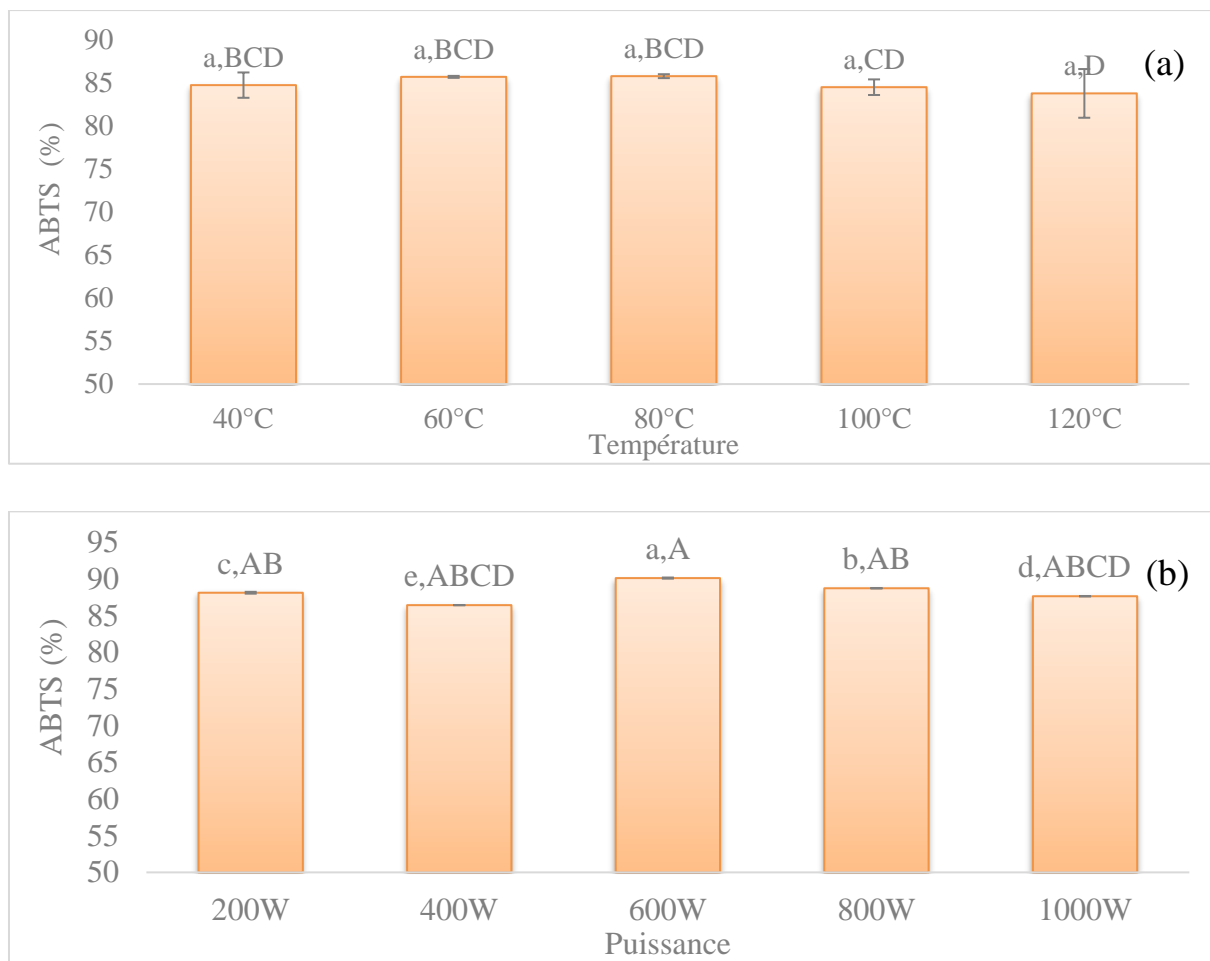
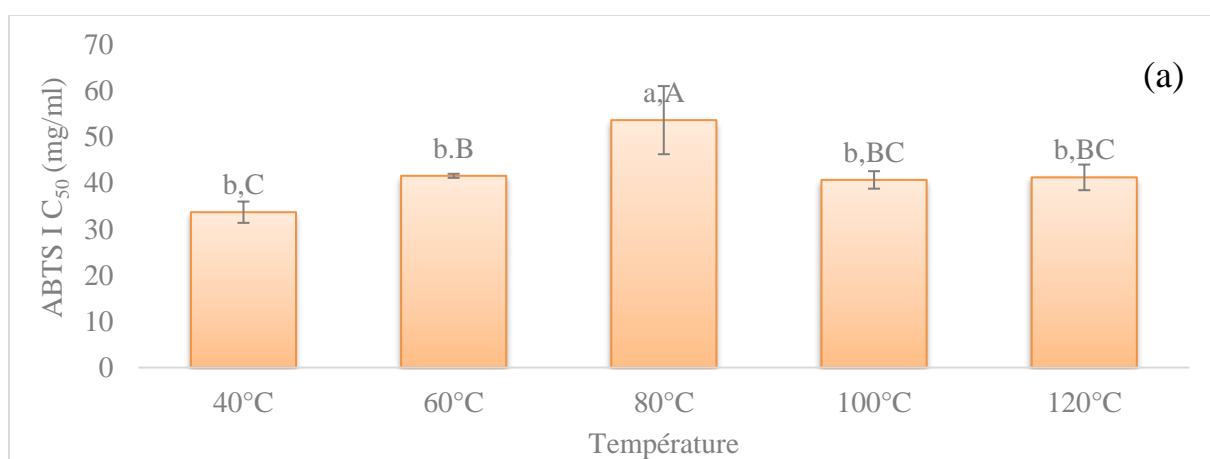


Figure 34. Pourcentage d'inhibition du radical ABTS⁺ par les extraits de l'orange sanguine. (a) Séchage par convection et (b) séchage par micro-ondes



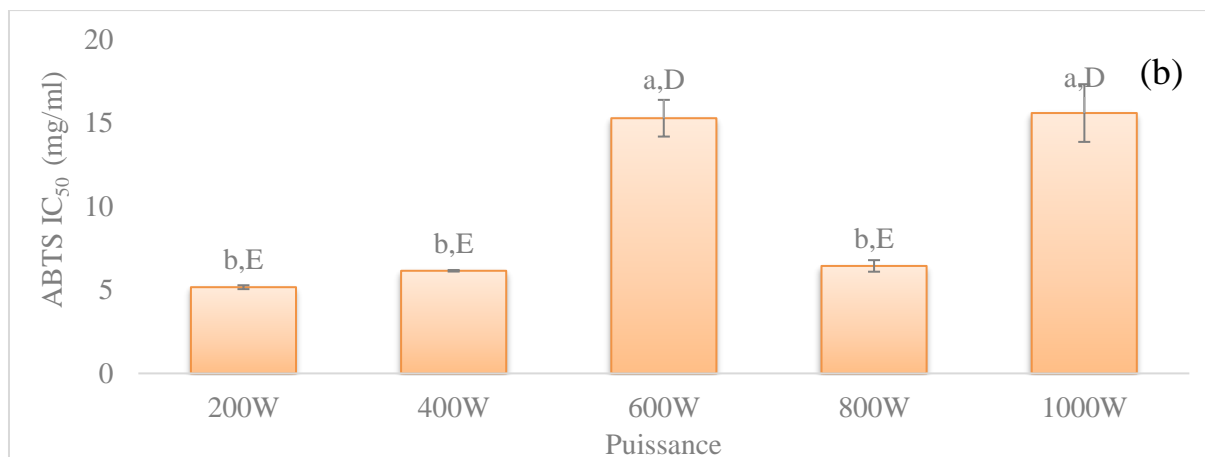


Figure 35 . IC₅₀ du radical ABTS⁺ des extraits de l'orange sanguine.

(a) Séchage par convection et (b) séchage par micro-ondes

D'après nos résultats, nous constatons que les différents extraits phénoliques de l'orange séchés par l'étuve, permettent de réduire le radical ABTS⁺. Les pourcentages d'inhibition ne présentent pas de différence significative pour toutes les températures utilisées et varient de 83,76 % (60 °C) à 85,68 % (80 °C), cependant, les pourcentages d'inhibition du radical ABTS⁺ lors du séchage micro-ondes varient de 86,44 % (400 W) à 90,06 % (600 W), bien que l'intervalle ne soit pas large mais des différences significatives entre toutes les puissances du micro-onde ont été signalées.

D'après les résultats relatifs aux micro-ondes, une corrélation entre les flavonoïdes et l'activité anti-radicalaire ABTS⁺ a été constatée. En effet, il a été aussi constaté qu'il y a eu un impact de la puissance et du temps de séchage sur l'activité anti-radicalaire. Ce qui peut expliquer certaines fluctuations (par exemple les résultats obtenus à 600 W et 800 W).

L'analyse statistique de la comparaison des deux techniques de séchage, a révélé que le séchage par micro-onde protège mieux les composés phénoliques qui ont exhibé une meilleure activité antioxydante.

II.1.2. Activité antioxydant des extraits au radical DPPH⁺

L'activité de piégeage du radical DPPH⁺ a été étudiée sur la base de séchage à l'étuve et au micro-onde ($p \leq 0,05$) exprimé en pourcentage (figure 36), et en IC₅₀ exprimé en milligramme par millilitre d'extrait (figure 37).

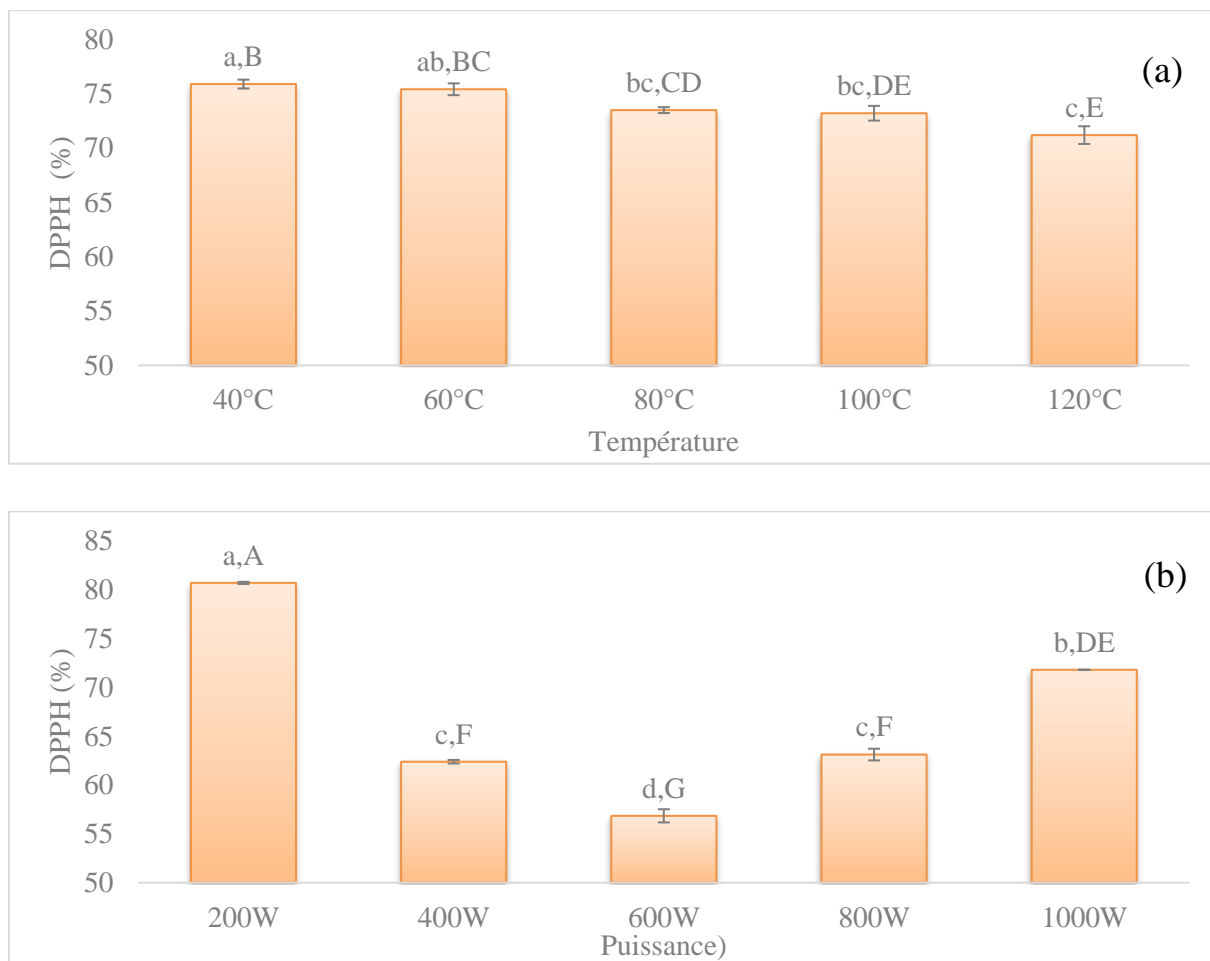
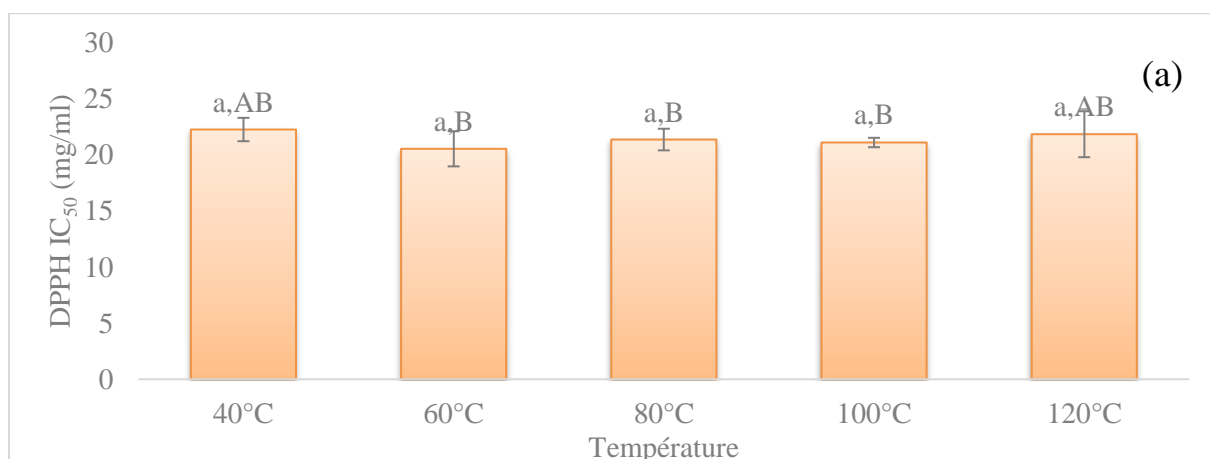


Figure 36. Pourcentage d'inhibition du radical DPPH⁺ par l'extraits d'orange sanguine. (a) Séchage par convection et (b) séchage par micro-ondes.



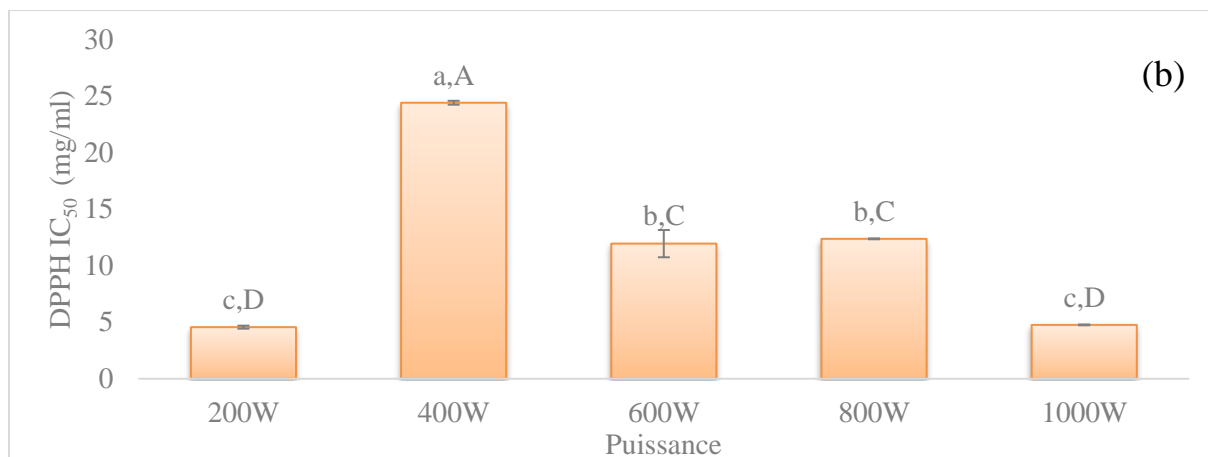


Figure 37. IC₅₀ du radical DPPH⁺ des extraits de l'orange sanguine.

(a) Séchage par convection et (b) séchage par micro-ondes.

Le séchage convectif a montré une tendance inversement proportionnelle à celle des polyphénols, où la déshydratation à 120 °C a donné l'activité antioxydante la plus basse avec un taux de 71,20 %, et la plus faible température 40 °C a présenté le pourcentage d'inhibition le plus grand 75,91 % ($p \leq 0,05$).

Cela peut être expliqué par le fait que les polyphénols présents dans les extraits de poudre d'orange sanguine séchées à 40 °C sont plus stables et possèdent une activité antioxydante meilleure que celles séchées à des températures plus élevées.

La capacité de piégeage du radical DPPH⁺ par les extraits séchés par micro-ondes présente des différences significatives entre toutes les puissances appliquées pour le séchage des oranges ($p \leq 0,05$). Selon les résultats rapportés, le pourcentage du pouvoir antiradicalaire DPPH⁺ varie de 56 % (600 W) à 80,70 % (200 W). Le résultat est cohérent avec celui du séchage convectif où la plus basse puissance appliquée donne le meilleur potentiel antioxydant.

La comparaison statistique entre les deux techniques de séchage, révèle que la puissance 200W du micro-onde protège mieux l'activité antioxydante (81,53% à l'état frais), suivie des températures de séchage 40 °C, 60 °C, et 80 °C, qui ne présentent pas de différences significatives entre elles.

Le résultat des IC₅₀ (concentration réduisant 50 % du DPPH⁺) obtenus dans cette étude sur les deux procédés de séchage est cohérent avec le résultat des pourcentages d'inhibition du DPPH⁺. En effet, plus la valeur IC₅₀ est faible, mieux est l'activité de piégeage des radicaux libres.

En comparant les deux techniques, il ressort que les meilleurs IC₅₀ sont attribués aux extraits de poudre de *Citrus sinensis* [L.] Osbeck séchée par micro-ondes ($p \leq 0,05$) qui varie de 4,56 à 24,42 mg/ml. Cependant des valeurs d'IC₅₀ des extraits de poudres séchées par l'étuve variaient entre 20,55 et 21,85 mg/ml d'extrait, bien qu'aucune différence significative n'ait été mentionnée au sein de procédé convectif.

Cette différence observée entre les deux techniques peut être reliée à la différence en potentiel phénolique, le type de polyphénol (polaire ou apolaire) et le temps de séchage (Garau, Simal, Rosselló, & Femenia, 2007).

Il est à signaler que l'état frais a présenté la meilleure IC₅₀ avec 3,48 mg/ml.

La neutralisation du DPPH⁺ par les extraits a été étudiée par de nombreux chercheurs. En présence de composés phénoliques qui donnent aisément des électrons pour le réduire (Nisha, Nazar, & Jayamurthy, 2009; Tepe, Eminagaoglu, Akpulat, & Aydin, 2007). En effet, selon le dosage de Folin-Ciocalteu, une corrélation positive a été observée entre le pouvoir antioxydant et la teneur des différents extraits en polyphénols et en flavonoïdes (Jayaprakasha & Patil, 2007; Klimczak et al., 2007; Mokrani & Madani, 2016; Rapisarda, Bianco, Pannuzzo, & Timpanaro, 2008; Romero-Díez et al., 2018). Contrairement aux travaux de López et al. (2010) portés sur le séchage convectif, le coefficient de corrélation entre les polyphénols totaux et l'activité de piégeage du DPPH⁺ s'est avéré faible, ce qui indique que d'autres composés phénoliques ou non phénoliques pourraient peut-être aussi contribuer à l'activité antioxydante.

Rapisarda et al. (1999) quant à eux, ont démontré que la teneur en anthocyanine est un facteur influençant l'activité antioxydante des fruits d'orange pigmentée.

A la lumière de ces deux tests antioxydants effectués, les résultats obtenus pour le test ABTS^{•+} est supérieur qu'à ceux du test DPPH⁺, cette constatation a été citée par Floegel, Kim, Chung, Koo, and Chun (2011) lorsqu'ils ont étudié une variété d'aliments végétaux contenant des composés antioxydants hydrophiles et fortement pigmentés.

II.1.3. Le pouvoir réducteur ferrique des extraits (FRAP)

Le test du pouvoir réducteur est souvent utilisé pour évaluer la capacité d'un antioxydant à donner un électron. Dans le test, les antioxydants provoquent la réduction du Fer ferrique (Fe³⁺) en fer ferreux (Fe²⁺), changeant ainsi la solution en différentes nuances du vert au bleu, selon le pouvoir réducteur des composés (Abou-Elella & Ali, 2014). L'effet de la variation des

températures et des puissances appliquées lors du séchage sur le pouvoir réducteur ferrique, exprimé en mg Eq AA/g MS est représenté dans la figure 38.

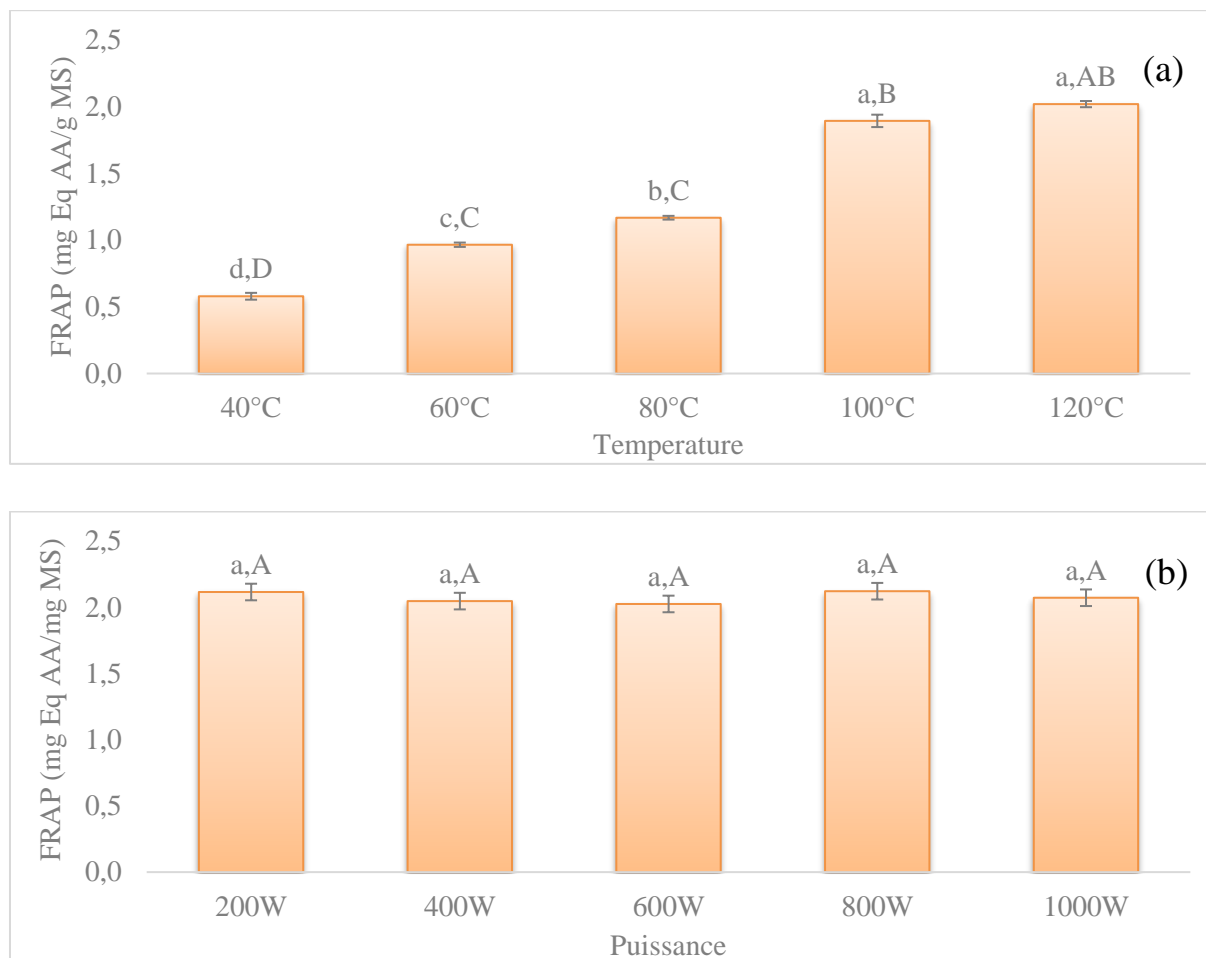


Figure 38. Pouvoir réducteur ferrique des extraits de l'orange sanguine.

(a) Séchage par convection et (b) séchage par micro-ondes.

Selon les résultats obtenus pour le séchage convectif, une tendance similaire a été observée des résultats du pouvoir réducteur ferrique à celles des résultats des polyphénols totaux. En effet, lorsque la température de séchage augmente à 40 °C et à 120 °C, une augmentation de la réduction du Fe^{3+} en Fe^{2+} s'observe et qui est de $0,57 \pm 0,02$ mg Eq AA/g MS à $2,01 \pm 0,02$ mg Eq AA/g MS, respectivement avec une différence hautement significative à ($p \leq 0,05$).

Ces résultats indiquent la corrélation entre l'activité antioxydante avec la quantité de composants phénoliques trouvés dans l'extrait. Par conséquent, les composés phénoliques de *Citrus sinensis* [L.] Osbeck sont considérés comme de bons donneurs d'électrons et pourraient mettre fin à la réaction en chaîne des radicaux en convertissant les radicaux libres en produits plus stables.

Pour le séchage par micro-ondes, les extraits ont présenté une grande réduction et un potentiel antioxydant supérieur à celui de séchage convectif, qui varie de 2,08 mg Eq AA/g MS à 2,18 mg Eq AA/g MS, et qui ne présente aucune différence significative entre toutes les puissances appliquées.

La présente étude comporte toutefois plusieurs limites. Tout d'abord, il faut tenir compte du fait que les tests ABTS⁺ et DPPH⁺ sont des modèles *in vitro* et ne permettent pas d'évaluer toutes les activités antioxydantes des aliments. Deuxièmement, l'éthanol a été utilisé pour l'extraction des antioxydants. Il est possible que les antioxydants liposolubles n'aient pas été extraits dans leur intégralité. Une étude précédente a signalé que la capacité antioxydante dépend du solvant utilisé (Pérez-Jiménez & Saura-Calixto, 2006).

Les résultats suggèrent que le test ABTS⁺ reflète mieux la teneur en antioxydants de divers aliments que le test DPPH⁺. Il a déjà été signalé que la capacité antioxydante déterminée par des tests *in vitro* diffère (Floegel et al., 2011; Ou, Huang, Hampsch-Woodill, Flanagan, & Deemer, 2002). En effet, le test ABTS⁺ est basé sur la génération d'un ABTS⁺ bleu/vert, ce qui est applicable aux systèmes antioxydants hydrophiles et lipophiles, tandis que le test DPPH⁺ utilise un radical dissous dans un milieu organique et est, par conséquent, applicable aux systèmes hydrophobes (Kim, Lee, Lee, & Lee, 2002).

L'ensemble de ces résultats suggère que les composés phénoliques contribuent de manière importante à la capacité antioxydante de ces aliments ; cependant, cela est probablement dû non seulement aux flavonoïdes mais aussi aux phénoliques non flavonoïdes.

Dans la littérature, l'activité antioxydante des jus d'agrumes dépend du type (position et nombre d'hydroxyle dans la molécule) et de la concentration des composés phénoliques, ainsi que de celle du métal de transition (Jayaprakasha & Patil, 2007; Kelebek et al., 2008).

II.2 Test de cytotoxicité

La capacité de certaines substances à induire l'hémolyse des érythrocytes humains est l'une des propriétés les plus restrictives dans toutes les applications alimentaires et pharmaceutiques. Cependant, les tests de cytotoxicité sont des méthodes permettant d'évaluer les dommages biologiques causés par divers composés bioactifs (Pietkiewicz et al., 2010).

Les globules rouges sont l'un des modèles les plus utilisés pour l'étude de la toxicité *in vitro* (Pagano et al., 2015 ; Abbou et al., 2019).

L'évaluation de la cytotoxicité par des tests d'activité hémolytique s'est avérée être une méthode alternative de dépistage de la toxicité simple. L'évaluation de l'activité hémolytique des érythrocytes contre les molécules bioactives est rapide, reproductible et peu coûteuse, et contribue ainsi à atteindre l'objectif de diminution, d'amélioration et de remplacement des études menées sur les animaux (Orsine, da Costa, da Silva, Santos, & Novaes, 2012).

Le test d'hémolyse a été évalué parce que, même si une substance possède un pouvoir antioxydant puissant et de propriétés alléchantes, son utilisation dans les préparations pharmacologiques et alimentaires sera impossible en présence de leur effet hémolytique, qui est un indicateur de cytotoxicité.

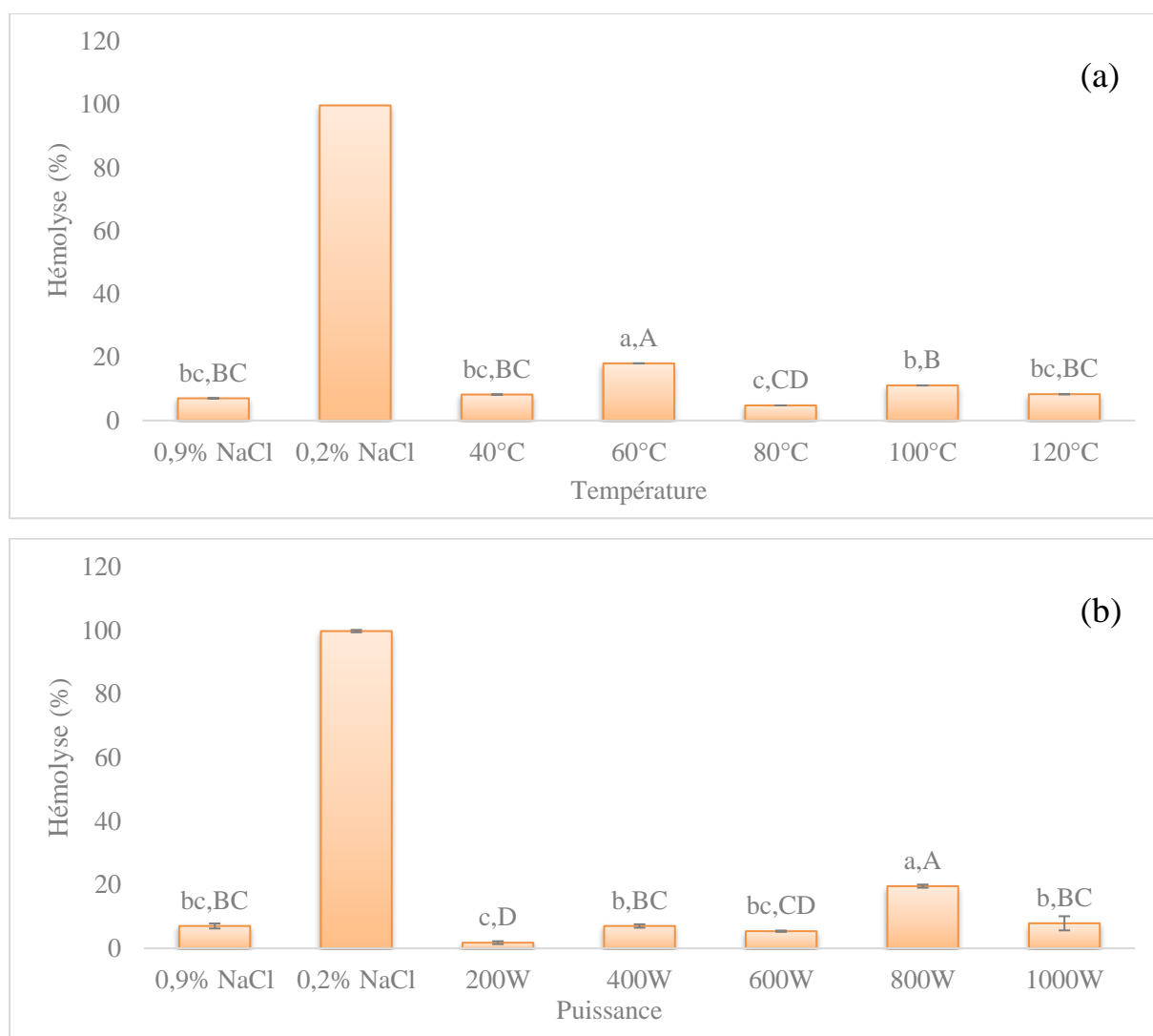


Figure 39. Pourcentage d'hémolyse des extraits d'orange sanguine.

(a) Séchage convectif et (b) séchage micro-ondes.

Le degré de cytotoxicité in vitro de l'activité hémolytique est évalué à partir du taux d'hémolyse observé : 0% à 9% = non-toxique ; 10% à 49% = légèrement toxique ; 50% à 89% = toxique ; et 90% à 100% = hautement toxique (Ralph, Ferreira, Ferreira, Lima, & Vasconcellos, 2009).

D'après la figure 38, nous remarquons des différences relativement non significatives dans l'hémolyse entre les différentes concentrations de l'extrait phénolique des extraits des poudres d'oranges séchées à 40 °C, 100 °C, 120 °C, 400 W et 1000 W avec le contrôle négatif (7,02 %). Ceci implique que les extraits présentent un faible pouvoir hémolytique des GR même à des concentrations élevées allant jusqu'à 100 mg/ml. Les extraits de poudres séchées à 80°C, 200 W et 600 W ont montré un effet cytoprotecteur des globules rouges, dont les pourcentages d'hémolyse ont diminué pour noter 4,76 ,5,77 et 5,38 %, respectivement. Cependant une légère activité cytotoxique des extraits à 60 °C et 800 W avec 18,08 et 19,54 % a été signalé. Ces mêmes extraits ont enregistré les concentrations les plus importantes en flavonoïdes.

L'extrait de l'orange sanguine fraîche a enregistré 14,62 % comme pourcentage d'hémolyse.

Ces résultats confirment la non-toxicité de la majorité de nos extraits phénoliques d'oranges sanguines malgré les concentrations extrêmes utilisées (100 mg/ml). Toutefois, d'autres études seront nécessaires pour l'isolement et la caractérisation des composés responsables de cette activité et l'identification de leurs mécanismes d'action in vivo.

Conclusion partielle

La seconde partie de cette thèse s'intéresse à l'étude comparative des procédés de séchage de l'orange sanguine *Citrus sinensis [L.] Osbeck* et de leurs influences sur la teneur et l'activité de l'eau (a_w), la couleur, la teneur en composés bioactifs et de leurs activités. Les deux techniques de séchage étudiées sont : le séchage convectif à 40, 60, 80, 100 et 120 °C et le séchage par micro-ondes à 200, 400, 600, 800, et 1000 W.

Les résultats des activités de l'eau des poudres étaient de 0,4 à 0,49, cela démontre que ces poudres sont relativement stables microbiologiquement en utilisant les deux méthodes de déshydratation (convectif et micro-ondes). L'étuve a permis de déshydrater et d'une manière très efficace les tranches d'orange sanguine, ce procédé a donné le plus bas taux d'humidité 6% à 80°C. Les paramètres de couleur des poudres déshydraté était variables.

Le rendement d'extraction des polyphénols le plus élevé a été attribué au séchage par micro-onde à des hautes puissances de 800 et 1000 W. Par contre le séchage avec la méthode convective a présenté les plus grands indices de polyphénols et cela a permis la récupération de la majeure partie de composés phénoliques présents dans les poudres avec un contenu de 15,33 mg Eq AG/g MS à 120 °C, et des caroténoïdes avec 120,75 µg Eq βC /g MS à 40 °C.

Par ailleurs, les résultats de dosage de différents composés bioactifs des extraits de l'orange sanguine ont révélé que ces poudres sont très riches en flavonoïdes (9,79 mg Eq Q/g MS) et en tannins condensés (4,27 mg Eq AT/g MS). Ces teneurs importantes en flavonoïdes et en tanins condensées sont enregistrées à des puissances de 200, 600 et 800 W de micro-onde.

Cependant, le rendement optimal en anthocyanes, est attribué encore au séchage par micro-ondes, avec une teneur de 0,44 mg Eq cy-3-glu/g MS détectée à 200 W et qui est supérieure à celle obtenue avec l'étuve à 40 °C mais cette teneur reste aussi importante qui est de 0.32 mg Eq cy-3-glu/g MS.

Les poudres d'orange sanguine séchée à 1000 W, ont marqué le taux le plus élevé en acide ascorbique (0,92 mg Eq AA/g de MS), alors que le séchage à l'étuve a donné une teneur maximale à 60 °C (0,70 mg Eq AA/g de MS).

Pour les trois activités antioxydantes les meilleurs effets inhibiteurs de l'oxydation sont revenus au séchage par micro-ondes et ont montré des tendances similaires à celles des flavonoïdes.

L'activité anti-radicalaire à l'ABTS^{·+} a démontré que l'extrait obtenue à 600 W du micro-onde a exhibé le meilleur effet inhibiteur avec un taux de 90,14 % et un IC₅₀ de 6,44 mg/ml, contre 85,92% pour le séchage à l'étuve à 80 °C (IC₅₀ de 33,66 mg/ml). La meilleure activité anti-radicalaire de DPPH[·], est attribuée aux poudres d'orange Moro séchées par micro-ondes à 200W (80,71%) avec un IC₅₀ de 4,56 mg/ml, contre 75,91 % du séchage par l'étuve à 40 °C avec un IC₅₀ de 22,27 mg/ml. Enfin, les extraits du micro-onde ont présenté une grande réduction et un potentiel antioxydant (FRAP) supérieur à celui de séchage convectif, et qui varie de 2,08 à 2,18 mg Eq AA/g MS.

Dans un premier temps, il est nécessaire d'exclure l'éventuelle cytotoxicité des extraits pour une utilisation future dans des préparations alimentaires ou pharmaceutiques par des tests qui évaluent à la fois la cytotoxicité et les activités hémolytiques de divers extraits. Les résultats du test in vitro de l'hémolyse des cellules érythrocytaire confirment la non-toxicité de nos extraits même à des concentrations élevées (100mg/ml).

Les résultats obtenus constituent la phase de recherche préliminaire qui représente une nouvelle frontière pour les applications ultérieures.

Les résultats de ce travail suggèrent que les oranges *Citrus sinensis* [L.] Osbeck déshydratées pourraient être des sources appropriées de composés nutritifs notamment les polyphénols qui présentent diverses activités biologiques, principalement l'activité antioxydante. En fait, les échantillons d'oranges séchées par micro-ondes sont potentiellement plus actifs que le séchage convectif.

Conclusion générale

L'orange sanguine est une variété saisonnière, pour la rendre disponible, le séchage est l'une des techniques les plus fréquemment utilisées. En raison de la grande variabilité des techniques de séchage, il est difficile de concevoir le meilleur procédé pour un produit donné.

Dans cette recherche, l'étude de l'effet du séchage des oranges sanguines a été entrepris par comparaison entre deux méthodes conventionnelles par étuve et innovante par micro-ondes d'une part sur la base des résultats cinétiques (la variation de taux d'humidité en fonction de temps et de la variation de la vitesse de séchage en fonction du temps ainsi que sa variation en fonction de taux d'humidité), le taux d'humidité et l'activité de l'eau dans les poudres sèches. D'autre part sur la base des résultats de la modélisation, du calcul des diffusivités de l'humidité et du suivi de leurs variations en fonction du taux d'humidité et aussi du calcul des énergies d'activation et de consommation ; Cela pour la première partie du travail. Cependant, la deuxième partie, s'est portée sur la comparaison à base de l'effet du séchage sur la composition (acide ascorbique, caroténoïdes, composés phénoliques) et sur certaines activités biologiques (l'activité antioxydante au radical ABTS^{·+} et au radical DPPH[·], le pouvoir réducteur ferrique et le test de cytotoxicité).

Les résultats cinétiques nous ont permis de déduire que le processus de séchage des oranges sanguine *Citrus sinensis* [L.] Osbeck se déroule en deux étapes : une étape de perte de masse rapide suivie d'une étape lente. Les résultats de l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps ont montré qu'au début des processus de séchage, la vitesse de séchage augmente rapidement pour atteindre son maximum, puis commence à diminuer au fur et à mesure que le processus de séchage progresse. Leur évolution (*DR*) en fonction de la teneur en eau a montré que les taux de séchage sont importants lorsque la teneur de l'échantillon en eau est élevée puis diminuent lorsque cette dernière diminue. Les résultats cinétiques ont également montré une forte influence de la température et des niveaux de puissance appliqués sur la réduction du temps de séchage ainsi que sur les taux de séchage impliqués. En effet, il a été constaté qu'une réduction significative du temps et des taux de séchage élevés ont été induits en appliquant les niveaux de température et de puissance les plus élevés. Cependant, en comparant les deux procédés, la réduction du temps et les taux de séchage les plus élevés ont été observés dans le cas du séchage par micro-ondes.

La détermination de la teneur en eau et de l'activité de l'eau des poudres sèches a révélé que les deux procédés ont permis de les réduire à des valeurs qui ne dépassant pas 11 % et 0,49 %, respectivement. Il y a donc une assurance de leur stabilité au cours du stockage ($a_w < 0,6$: seuil requis pour la stabilité au cours de stockage).

La modélisation ou la simulation des données expérimentales des cinétiques de séchage est appliquée sur trente-huit (38) modèles mathématiques et les résultats nous ont permis de choisir le modèle de Sledz et al et Midilli et Kucuk comme les meilleurs modèles pour décrire l'impact du séchage micro-ondes et convectif des oranges sanguines Moro, respectivement, renforcé par les valeurs de R^2 les plus élevées et les valeurs de χ^2 et RMSE les plus faibles. Ce résultat a également été confirmé par la forte corrélation entre les valeurs MR prédites par ce modèle et les valeurs MR expérimentales.

Quant aux diffusivités effectives de l'humidité, elles ont montré une relation inverse avec la teneur en humidité, lorsque les valeurs de diffusivités effectives de l'humidité augmentaient progressivement la teneur en humidité diminuait.

À leur tour, les diffusivités effectives de l'humidité ont été affectées par les niveaux de température et des puissances appliqués pendant le séchage, et ont particulièrement les mêmes tendances que les taux de séchage : des diffusivités plus élevées ont été observées lorsque des températures et des puissances élevées ont été appliquées. En comparant les deux procédés, les diffusions effectives d'humidité les plus élevées ont été observées dans le cas du séchage par micro-ondes, ce qui explique le temps de séchage réduits pour ce procédé.

En ce qui concerne la consommation d'énergie et l'efficacité énergétique, les résultats obtenus ont montré que la consommation d'énergie est faible et que l'efficacité énergétique est élevée lorsque les températures de convection ou les niveaux de puissance des micro-ondes sont élevés. Nos résultats ont également montré que la consommation d'énergie est plus importante lors de l'application du séchage par convection alors que l'efficacité énergétique élevée est obtenue pour le technique micro-ondes.

D'après les résultats de l'effet des techniques de séchage sur la composition, il s'avère que le rendement en composés phénoliques extrait par macération augmente à mesure que la température et la puissance augmente, néanmoins les meilleurs rendements de cette extraction ont été attribués clairement au séchage par micro-ondes. Et qui a présenté le moins d'effet sur la dégradation des paramètres de couleur des tranches d'oranges séchés comparé aux convectif.

Cependant l'étuve permet une meilleure conservation des polyphénols totaux que le micro-onde. Toutefois, cette différence n'était pas aussi significative pour les températures et les puissances élevées.

Les teneurs élevées suivant les puissances et températures élevées peuvent s'expliquer par la chaleur intense générée qui crée une pression de vapeur et fragilise les polymères des parois cellulaires des plantes pour permettre la libération des composés phénoliques liés. Aussi ce phénomène pourrait être expliqué par le fait que le chauffage très rapide des polyphénols oxydases, retardant ainsi la détérioration enzymatique des polyphénols.

Les flavonoïdes représentent la fraction majoritaire des composés phénoliques de l'orange sanguine, dont les micro-ondes permettent une meilleure protection des pertes suite au séchage. La teneur en flavonoïdes totaux des poudres séchées par micro-onde a montré une tendance proche voire similaire que celle des polyphénols totaux pour l'étuve et le micro-onde respectivement.

La dégradation des anthocyanes est considérablement affectée par les conditions de séchage avec l'augmentation des températures et des puissances et le temps de séchage. En comparant les deux techniques statistiquement beaucoup de chevauchements ont été observés, la puissance 200 W du micro-onde a donné le résultat le plus élevé, en revanche, la plus grande dégradation des anthocyanes a été signalée pour les puissances les plus élevées à savoir 800 et 1000 W.

Les teneurs en tannins condensés des poudres de *Citrus sinensis* [L.] Osbeck, ont présenté une tendance identique à celle des teneurs en flavonoïdes, que ce soit pour le séchage convectif ou le séchage par micro-ondes. La comparaison des deux techniques de séchage, révèle que cette dernière conserve mieux les tannins condensés des poudres d'oranges séchées quel que soit la puissance mieux que la technique convective.

D'après les résultats relatifs aux micro-ondes, nous avons constaté qu'il y a eu une corrélation entre les flavonoïdes et l'activité anti-radicalaire ABTS^{•+}. En effet, il a été aussi constaté qu'il y a eu un impact de la puissance et du temps de séchage sur l'activité anti-radicalaire.

La comparaison entre les deux techniques de séchage, a révélé que le séchage par micro-onde protège mieux les composés phénoliques qui ont exhibé une meilleure activité antioxydante vis-à-vis du radical ABTS^{•+}.

Le résultat de l'activité antioxydante au DPPH⁺ du séchage convectif a montré une tendance inversement proportionnelle à celle des polyphénols est cohérente avec celui du séchage micro-onde où la plus basse puissance appliquée donne le meilleur potentiel antioxydant. Cela peut être expliqué par le fait que les molécules impliquées dans cette activité ont subi les faibles agréassions à 40°C et 200 W que celles séchées à des températures plus élevées, sont plus stables et possèdent une activité antioxydante au DPPH⁺ meilleure.

En comparant les deux techniques, il ressort que les meilleurs IC₅₀ sont attribuées aux extraits de poudre de *Citrus sinensis* [L.] Osbeck séchée par micro-ondes, cette différence observée peut être reliée à la différence en potentiel phénolique, le type du polyphénol et le temps de séchage.

Une corrélation positive a été observée entre le pouvoir antioxydant ferrique et la teneur des différents extraits en polyphénols et en flavonoïdes principalement. Par conséquent, les composés phénoliques de *Citrus sinensis* [L.] Osbeck sont considérés comme de bons donneurs d'électrons et pourraient mettre fin à la réaction en chaîne des radicaux en convertissant les radicaux libres en produits plus stables. Les extraits issus du séchage par micro-ondes, ont présenté un potentiel antioxydant supérieur à celui de séchage convectif.

L'ensemble de ces résultats suggère que les composés phénoliques contribuent de manière importante à la capacité antioxydante de ces aliments ; cependant, cela est probablement dû non seulement aux flavonoïdes mais aussi à d'autres molécules.

Le test d'hémolyse est un outil que le l'industriel agroalimentaire et scientifique pharmaceutique peut utiliser comme guide pour évaluer la sécurité et l'utilité d'une formulation parentérale. L'analyse effectuée sur tous les extraits phénoliques, a démontré que nos tranches d'orange sanguine séchées via les deux techniques conventionnelle et innovante, pourraient être destinées à la consommation humaine vu leurs non-toxicités même à des concentrations très élevées.

Sur la base de ces constatations, nous pouvons conclure que les deux techniques pouvaient s'appliquer au séchage des tranches d'orange sanguine et que la technique de séchage par micro-ondes est la meilleure pour le séchage convectif, étant donné que les nombreux avantages rapportés dans cette étude, notamment le temps de séchage réduit, les taux de séchage élevés, les diffusivités élevées, la faible consommation d'énergie, le rendement énergétique élevé, la qualité nutritionnelle et les activités biologiques les mieux conservés.

Les informations rapportées dans cette étude permettent d'identifier le meilleur procédé de séchage, ce qui permettra à l'industrie de gérer efficacement les techniques de séchage et d'éviter ainsi la surconsommation d'énergie. Les résultats obtenus sont donc utiles dans le cas de la conception technologique du séchage par convection ou par micro-ondes pour la conservation des oranges.

Toutefois, il serait souhaitable de compléter ces travaux par d'autres approches et études afin de l'approfondir :

- Réaliser des analyses sensorielles et organoleptiques des poudres séchées pour étudier leur appréciation par le consommateur ;
- Étudier la possibilité de réhydrater les poudres une fois qu'elles ont été incorporées dans des préparations alimentaires ;
- Utiliser des techniques d'analyses plus performantes telles que HPLC-MS, pour l'identification de la composition des extraits ;
- Déterminer l'effet du séchage en analysant la macrostructure des tranches d'orange obtenues après séchage ainsi que la microstructure des poudres ;
- Réaliser des analyses : sucres, protéines, acides gras, acides organiques et minéraux ;
- L'évaluation de l'activité antimicrobienne des différents extraits étudiés.

La réalisation de ces perspectives permet la désignation de la meilleure poudre qui permettra son intégration sur le marché.

ANNEXES

Annexe I : Préparation des solutions de dosages

Chlorure d'aluminium (AlCl₃, 2%)

AlCl₃2 g

Methanol.....100 ml

Carbonate de sodium (Na₂ CO₃, 7, 5%)

Na₂ CO₃.....7, 5 g

Eau distillée.....100 ml

Réactif de Folin-Ciocalteu (dilué à 1/10)

Réactif de Folin-Ciocalteu.....1 ml

Eau distillée.....9 ml

Tampon acétate (PH = 4,9)

Acide acétique (0,2M).....0,48 ml

Na Cl (0,17M).....0, 394 g

Eau distillée.....40 ml

PH ajusté à 4,9 avec Na OH 1N (cas ou PH < à 4,9)

Ou ; l'HCl 1N (cas ou PH > à 4,9)

BSA (1g/L dans le tampon acétate)

BSA.....40 mg

Tampon acétate40 ml

Acide gallique (0,1 mg/ml)

Acide gallique.....1 mg

Eau distillée.....10 ml

Quercetine (0,01mg/ml)

Quercetine.....1 mg

Eau distillée.....100 ml

Réactif ferrique

(2% de sulfate de fer et d'ammonium dans HCL à 2M)

Sulfate de fer et d'ammonium.....2 g

HCL (2M).....100 ml

Chlorure ferrique (Fe Cl₃, 0,1%)

Fe Cl₃.....0,1 g

Eau distillée.....100 ml

Acétate de sodium (0,4M, pH 4,5)

CH₃COONa.....3, 28 g
Eau distillée.....100 ml
PH ajusté à 4,5 avec Na OH 1N (cas ou PH < à 4,5)
Ou : l'HCl 1N (cas ou PH > à 4,5)

Chlorure de potassium (0,025M, pH 1,0)

K Cl.....0,18635 g
Eau distillée.....100 ml
PH ajusté à 1,0 avec Na OH 1N (cas ou PH < à 1,0)
PH ajusté à 1,0 avec H Cl 1N (cas ou PH > à 1,0)

Acide tannique (0,1 mg/ml)

Acide tannique.....10 mg
Eau distillée ou éthanol.....100 ml

Tampon phosphate (0,2M et pH 6,6)

KH₂PO₄ (2,7218 g) dans l'eau distillée (100 ml)
K₂HPO₄ (3,4836 g) dans l'eau distillée (100 ml)
PH de la solution de KH₂PO₄ ajusté à 6,6 avec la solution de K₂HPO₄ (cas ou PH < à 6,6)
PH de la solution de K₂HPO₄ ajusté à 6,6 avec la solution de KH₂PO₄ (cas ou PH > à 6,6)

Ferricyanure de potassium (1%, m/v)

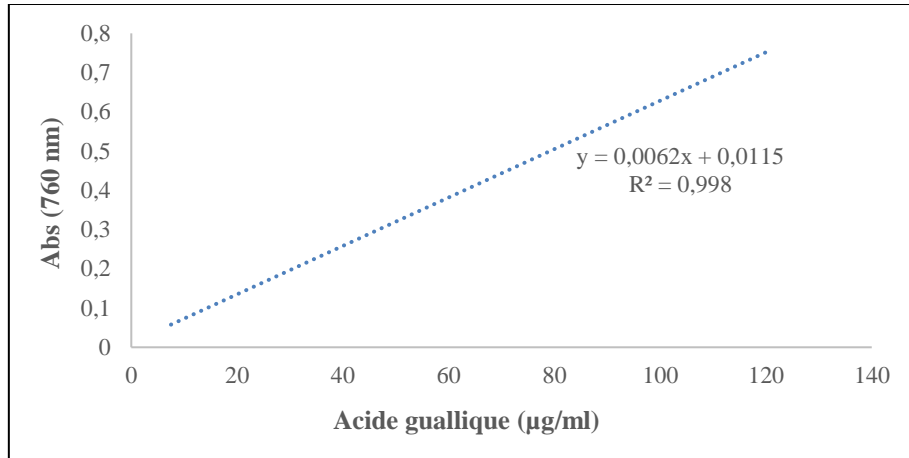
Ferricyanure de potassium.....1g
Eau distillée.....100 ml

Acide trichloracétique (10%, m/v)

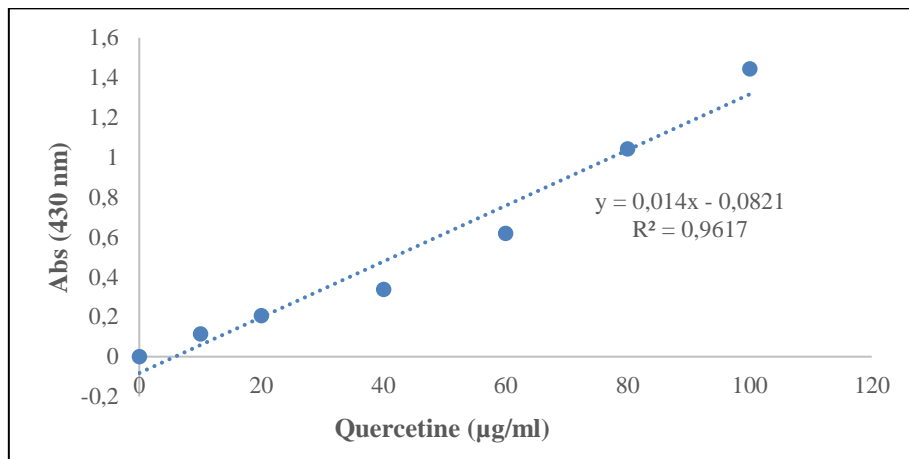
Acide trichloracétique.....10g
Eau distillée.....100 ml

Annexe II : les courbes d'étalonnage

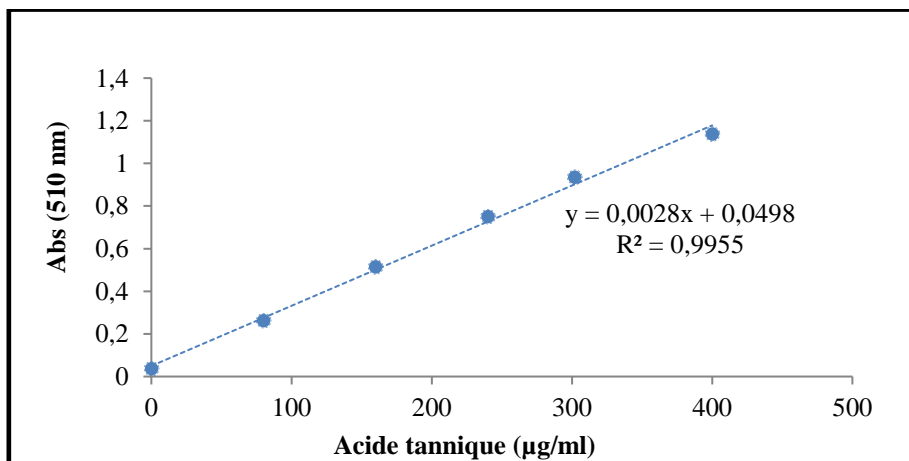
1. Courbe d'étalonnage pour le dosage des polyphénols totaux



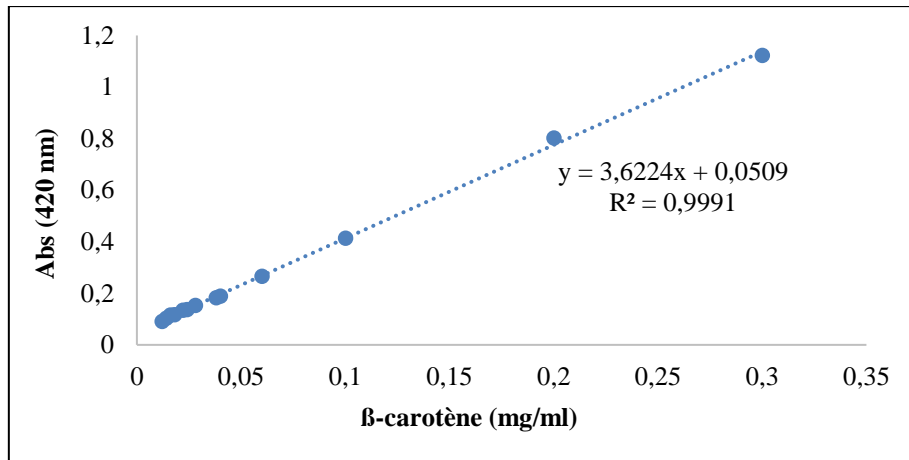
2. Courbe d'étalonnage pour le dosage des flavonoïdes



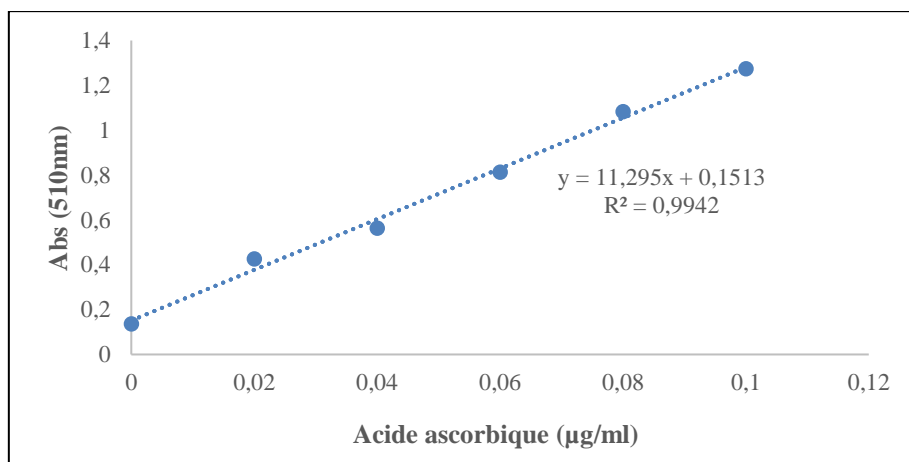
3. Courbe d'étalonnage pour le dosage des tannins



4. Courbe d'étalonnage pour le dosage des caroténoïdes



5. Courbe d'étalonnage pour le pouvoir réducteur (FRAP)



RÉFÉRENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- Abbou, A., Kadri, N., Debbache, N., Dairi, S., Remini, H., Dahmoune, F., . . . Madani, K. (2019). Effect of precipitation solvent on some biological activities of polysaccharides from *Pinus halepensis* Mill. seeds. *International journal of biological macromolecules*, *141*, 663-670.
- Abou-Elella, F. M., & Ali, R. F. M. (2014). Antioxidant and anticancer activities of different constituents extracted from Egyptian prickly pear Cactus (*Opuntia Ficus-Indica*) Peel. *Biochem Anal Biochem*, *3*(158), 2161-1009.1000158.
- Abouo, V. N., Sadat, A., Akmel, C. D., Assidjo, E. N., & Amani, G. N. (2016). Impact of Solar and Microwave Oven Drying on A Few Chemical Parameters of Market Value Quality of Fermented Forastero (*Theobroma Cacao* L.). *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, *12*(4), 402-406.
- Achat, S., Tomao, V., Madani, K., Chibane, M., Elmaataoui, M., Dangles, O., & Chemat, F. (2012). Direct enrichment of olive oil in oleuropein by ultrasound-assisted maceration at laboratory and pilot plant scale. *Ultrasonics sonochemistry*, *19*(4), 777-786.
- Aderibigbe, O., Ezekiel, O., Owolade, S., Korese, J., Sturm, B., & Hensel, O. (2022). Exploring the potentials of underutilized grain amaranth (*Amaranthus* spp.) along the value chain for food and nutrition security: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *62*(3), 656-669.
- Agbede, O. O., Oke, E. O., Akinfenwa, S. I., Wahab, K. T., Ogundipe, S., Aworanti, O. A., . . . Babatunde, K. A. (2020). Thin layer drying of green microalgae (*Chlorella* sp.) paste biomass: Drying characteristics, energy requirement and mathematical modeling. *Bioresource Technology Reports*, *11*. doi:10.1016/j.biteb.2020.100467
- Akpinar, E. K. (2006). Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. *Journal of Food Engineering*, *73*(1), 75-84. doi:10.1016/j.jfoodeng.2005.01.007
- Al Haddad, M. (2007). *Contribution théorique et modélisation des phénomènes instantanés dans les opérations d'autovaporisation et de déshydratation*.
- Alaei, B., & Chayjan, R. A. (2015). Modelling of nectarine drying under near infrared? Vacuum conditions. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, *14*(1), 15-27. doi:10.17306/J.AFS.2015.1.2
- Alene, A. (2016). *Extraction and Characterization of Antioxidant from Orange Peels*. Addis Ababa University,
- Alibas, I. (2007). Microwave, air and combined microwave–air-drying parameters of pumpkin slices. *LWT-food science and technology*, *40*(8), 1445-1451.
- Alibas, I. (2014). Microwave, Air and Combined Microwave-Air Drying of Grape Leaves (*Vitis vinifera* L.) and the Determination of Some Quality Parameters. *International Journal of Food Engineering*, *10*(1), 69-88. doi:10.1515/ijfe-2012-0037
- Alibas, I., & Kacar, O. (2016). Microwave Drying Kinetics, Hypericin Content, Effective Moisture Diffusivity and Activation Energy of *Hypericum perforatum* L. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, *19*(2), 454-465. doi:10.1080/0972060x.2016.1159530
- Alibas, I., & Yilmaz, A. (2021). Microwave and convective drying kinetics and thermal properties of orange slices and effect of drying on some phytochemical parameters. *J Therm Anal Calorim*, 1-21. doi:10.1007/s10973-021-11108-3
- Amami, E., Khezami, W., Mezrigui, S., Badwaik, L. S., Bejar, A. K., Perez, C. T., & Kechaou, N. (2017). Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on the convective drying of strawberry. *Ultrasonics sonochemistry*, *36*, 286-300. doi:10.1016/j.ultsonch.2016.12.007

- Amanlou, Y., Hashjin, T. T., Ghobadian, B., & Najafi, G. (2015). Mathematical modeling of thin-layer solar drying for yarrow, coriander and hollyhock. *International Journal of Food Engineering*, *11*(5), 691-700.
- Amanlou, Y., Tavakoli Hashjin, T., Ghobadian, B., & Najafi, G. (2015). Mathematical Modeling of Thin-Layer Solar Drying for Yarrow, Coriander and Hollyhock. *International Journal of Food Engineering*, *0*(0). doi:10.1515/ijfe-2015-0134
- Amini, G., Salehi, F., & Rasouli, M. (2021). Drying kinetics of basil seed mucilage in an infrared dryer: Application of GA-ANN and ANFIS for the prediction of drying time and moisture ratio. *Journal of Food Processing and Preservation*, *45*(3). doi:10.1111/jfpp.15258
- Amiri Chayjan, R., Kaveh, M., & Khayati, S. (2015). Modeling Drying Characteristics of Hawthorn Fruit under Microwave-Convective Conditions. *Journal of Food Processing and Preservation*, *39*(3), 239-253. doi:10.1111/jfpp.12226
- Amiri Chayjan, R., & Shadidi, B. (2014). Modeling high-moisture Faba bean drying in fixed and semi-fluidized bed conditions. *Journal of Food Processing and Preservation*, *38*(1), 200-211.
- Aral, S., & Beş, A. V. (2016). Convective drying of hawthorn fruit (*Crataegus* spp.): Effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity. *Food Chemistry*, *210*, 577-584.
- Arkoub-Djermoune, L., Boulekbache-Makhlouf, L., Zeghichi-Hamri, S., Bellili, S., Boukhalfa, F., & Madani, K. (2016). Influence of the Thermal Processing on the Physico-Chemical Properties and the Antioxidant Activity of A Solanaceae Vegetable: Eggplant. *Journal of Food Quality*, *39*(3), 181-191. doi:10.1111/jfq.12192
- Azam-Ali, S. (2007). Drying of foods. *Practical Action, United Kingdom*, 15.
- Azeez, L., Adebisi, S. A., Oyediji, A. O., Adetoro, R. O., & Tijani, K. O. (2019). Bioactive compounds' contents, drying kinetics and mathematical modelling of tomato slices influenced by drying temperatures and time. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, *18*(2), 120-126. doi:10.1016/j.jssas.2017.03.002
- Babalís, S. J., Papanicolaou, E., Kyriakis, N., & Belessiotis, V. G. (2006). Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*). *Journal of Food Engineering*, *75*(2), 205-214. doi:10.1016/j.jfoodeng.2005.04.008
- Barreca, D., Bellocco, E., Ficarra, S., Laganà, G., Galtieri, A., Tellone, E., & Gattuso, G. (2018). Analysis of C-Glycosyl Flavones and 3-Hydroxy-3-methylglutaryl-glycosyl Derivatives in Blood Oranges (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) Juices and Their Influence on Biological Activity. In *Advances in Plant Phenolics: From Chemistry to Human Health* (pp. 67-80): ACS Publications.
- Belmehdi, T., & Boudries, H. (2018). Optimisation des conditions d'extraction des antioxydants à partir du sous-produit industriel de fabrication des jus d'orange.
- Ben Haj Said, L., Najjaa, H., Farhat, A., Neffati, M., & Bellagha, S. (2015). Thin layer convective air drying of wild edible plant (*Allium roseum*) leaves: experimental kinetics, modeling and quality. *Journal of Food Science and Technology*, *52*(6), 3739-3749.
- Ben Haj Said, L., Najjaa, H., Farhat, A., Neffati, M., & Bellagha, S. (2015). Thin layer convective air drying of wild edible plant (*Allium roseum*) leaves: experimental kinetics, modeling and quality. *J Food Sci Technol*, *52*(6), 3739-3749. doi:10.1007/s13197-014-1435-2
- Bennaceur, S., Berreguioua, A., Bennamoun, L., Mulet, A., Draoui, B., Abid, M., & Carcel, J. A. (2021). Effect of Ultrasound on Henna Leaves Drying and Extraction of Lawsone: Experimental and Modeling Study. *Energies*, *14*(5). doi:10.3390/en14051329

- Berlinet, C., Brat, P., Brillouet, J. M., & Ducruet, V. (2006). Ascorbic acid, aroma compounds and browning of orange juices related to PET packaging materials and pH. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(13), 2206-2212.
- Bettaieb Rebey, I., Jabri-Karoui, I., Hamrouni-Sellami, I., Bourgou, S., Limam, F., & Marzouk, B. (2012). Effect of drought on the biochemical composition and antioxidant activities of cumin (*Cuminum cyminum* L.) seeds. *Industrial Crops and Products*, 36(1), 238-245. doi:10.1016/j.indcrop.2011.09.013
- Bhattacharya, M., Srivastav, P. P., & Mishra, H. N. (2015). Thin-layer modeling of convective and microwave-convective drying of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*). *J Food Sci Technol*, 52(4), 2013-2022. doi:10.1007/s13197-013-1209-2
- Bishnoi, S., Chhikara, N., Singhania, N., & Ray, A. B. (2020). Effect of cabinet drying on nutritional quality and drying kinetics of fenugreek leaves (*Trigonella foenum-graecum* L.). *Journal of Agriculture and Food Research*, 2, 100072.
- BONAZZI, C., & BIMBENET, J.-J. (2003). Séchage des produits alimentaires Principes. *Techniques de l'ingénieur. Agroalimentaire*, 2(F3000), F3000. 3001-F3000. 3014.
- Bonazzi, C., & Bimbenet, J.-J. (2008). Séchage des produits alimentaires: Appareils et applications. *Techniques de l'ingénieur. Agroalimentaire*, 2(F3002).
- Bonazzi, C., & Dumoulin, E. (2011a). Quality changes in food materials as influenced by drying processes. *Modern drying technology*, 3, 1-20.
- Bonazzi, C., & Dumoulin, E. (2011b). Quality changes in food materials as influenced by drying processes. *Modern drying technology, volume 3: Product quality and formulation*, 1-20.
- Bonazzi, C., Dumoulin, E., & Bimbenet, J. (2008). Le séchage des produits alimentaires. *Industrie Alimentaire Agricole*, 125(03-04), 12-22.
- Boubekri, C. (2014). *Etude de l'activité antioxydante des polyphénols extraits de Solanum melongena par des techniques électrochimiques*. Université Mohamed Khider Biskra,
- Bouchra, C., & Souhila, C. (2015). Contribution à l'étude de la biodiversité entomologique dans des vergers d'agrumes dans la région de Guelma.
- Boullard, B. (2001). *Plantes médicinales du monde: croyances et réalités: De Boeck Secundair*.
- Bousbia, N. (2011). *Extraction des huiles essentielles riches en anti-oxydants à partir de produits naturels et de co-produits agroalimentaires*.
- Bozkir, H. (2020). Effects of hot air, vacuum infrared, and vacuum microwave dryers on the drying kinetics and quality characteristics of orange slices. *Journal of Food Process Engineering*, 43(10). doi:10.1111/jfpe.13485
- Brennan, J. G., & Grandison, A. S. (2006). *Food processing handbook*.
- Cao, X., Zhang, M., Fang, Z., Mujumdar, A. S., Jiang, H., Qian, H., & Ai, H. (2016). Drying kinetics and product quality of green soybean under different microwave drying methods. *Drying Technology*, 35(2), 240-248. doi:10.1080/07373937.2016.1170698
- Cao, X., Zhang, M., Fang, Z., Mujumdar, A. S., Jiang, H., Qian, H., & Ai, H. (2017). Drying kinetics and product quality of green soybean under different microwave drying methods. *Drying Technology*, 35(2), 240-248.
- Cebadera-Miranda, L., Dominguez, L., Dias, M. I., Barros, L., Ferreira, I., Igual, M., . . . Camara, M. (2019). Sanguinello and Tarocco (*Citrus sinensis* [L.] Osbeck): Bioactive compounds and colour appearance of blood oranges. *Food Chem*, 270, 395-402. doi:10.1016/j.foodchem.2018.07.094
- Çelen, S., Haksever, A., & Moralar, A. (2017). The Effects of Microwave Energy to the Drying of Apple (Gala) Slices. *Karaelmas Science & Engineering Journal*, 7(1).
- Cengel, Y. A., Klein, S., & Beckman, W. (1998). *Heat transfer: a practical approach* (Vol. 141): McGraw-Hill New York.

- Chayjan, R. A., Salari, K., Abedi, Q., & Sabziparvar, A. A. (2013). Modeling moisture diffusivity, activation energy and specific energy consumption of squash seeds in a semi fluidized and fluidized bed drying. *Journal of Food Science and Technology*, 50(4), 667-677.
- Chen, C., Venkitasamy, C., Zhang, W., Khir, R., Upadhyaya, S., & Pan, Z. (2020). Effective moisture diffusivity and drying simulation of walnuts under hot air. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 150. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119283
- Chen, X. D., & Mujumdar, A. S. (2009). *Drying technologies in food processing*: John Wiley & Sons.
- Cherrat, S., Boulkebatche-Makhlouf, L., Zeghichi, S., & Walker, G. (2020). Effect of different drying temperatures on the composition and antioxidant activity of ginger powder. *The Annals of the University Dunarea de Jos of Galati Fascicle VI – Food Technology*, 44(1), 125-142. doi:10.35219/foodtechnology.2019.2.09
- Chukwuezie, O., Nwakuba, N., Asoegwu, S., & Nwaigwe, K. (2017). Cetane number effect on engine performance and gas emission: a review. *Am J Eng Res*, 6, 56-67.
- Coradi, P. C., Melo, E. d. C., & Rocha, R. P. d. (2014). Evaluation of electrical conductivity as a quality parameter of lemongrass leaves (*Cymbopogon Citratus* Stapf) submitted to drying process. *Drying Technology*, 32(8), 969-980.
- Cordeiro, D., Raghavan, G., & Oliveira, W. P. d. (2006). Equilibrium moisture content models for *Maytenus ilicifolia* leaves. *Biosystems Engineering*, 94(2), 221-228.
- Correia, A., Loro, A., Zanatta, S., Spoto, M., & Vieira, T. (2015). Effect of temperature, time, and material thickness on the dehydration process of tomato. *International journal of food science*, 2015.
- Dadali, G., Kılıç Apar, D., & Özbek, B. (2007). Microwave drying kinetics of okra. *Drying Technology*, 25(5), 917-924.
- Darvishi, H., Asl, A. R., Asghari, A., Azadbakht, M., Najafi, G., & Khodaei, J. (2014). Study of the drying kinetics of pepper. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 13(2), 130-138.
- Darvishi, H., Khoshtaghaza, M. H., & Minaei, S. (2014). Drying kinetics and colour change of lemon slices. *International Agrophysics*, 28(1), 1-6. doi:10.2478/intag-2013-0021
- Darvishi, H., Mohammadi, P., Fadavi, A., Koushesh Saba, M., & Behrooz-Khazaei, N. (2019). Quality preservation of orange concentrate by using hybrid ohmic - Vacuum heating. *Food Chem*, 289, 292-298. doi:10.1016/j.foodchem.2019.03.043
- Darvishi, H., Zarein, M., & Farhudi, Z. (2016). Energetic and exergetic performance analysis and modeling of drying kinetics of kiwi slices. *Journal of Food Science and Technology*, 53(5), 2317-2333. doi:10.1007/s13197-016-2199-7
- Dash, K. K., Chakraborty, S., & Singh, Y. R. (2020). Modeling of Microwave Vacuum Drying Kinetics of Bael (*Aegle marmelos* L.) Pulp by Using Artificial Neural Network. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 101(2), 343-351. doi:10.1007/s40030-020-00431-x
- de Holanda Rosanova, A., Maia, G. D., Freire, F. B., & do Carmo Ferreira, M. (2017). A neural based modeling approach for drying kinetics analysis of mint branches and their fractions (leaves and stems). *Advances in Chemical Engineering and Science*, 7(2), 154-174.
- Debbabi, M., Nury, T., Zarrouk, A., Mekahli, N., Bezine, M., Sghaier, R., . . . Camus, E. (2016). Protective effects of α -tocopherol, γ -tocopherol and oleic acid, three compounds of olive oils, and no effect of trolox, on 7-ketocholesterol-induced mitochondrial and peroxisomal dysfunction in microglial BV-2 cells. *International journal of molecular sciences*, 17(12), 1973.

- Del Caro, A., Piga, A., Vacca, V., & Agabbio, M. (2004). Changes of flavonoids, vitamin C and antioxidant capacity in minimally processed citrus segments and juices during storage. *Food chemistry*, 84(1), 99-105.
- Demirhan, E., & Özbek, B. (2009). Color change kinetics of microwave-dried basil. *Drying Technology*, 27(1), 156-166. doi:10.1080/07373930802566101
- Demirhan, E., & Özbek, B. (2011). Thin-layer drying characteristics and modeling of celery leaves undergoing microwave treatment. *Chemical Engineering Communications*, 198(7), 957-975.
- Deng, L. Z., Mujumdar, A. S., Yang, W. X., Zhang, Q., Zheng, Z. A., Wu, M., & Xiao, H. W. (2019). Hot air impingement drying kinetics and quality attributes of orange peel. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(1). doi:10.1111/jfpp.14294
- Dong, H., Dai, T., Liang, L., Deng, L., Liu, C., Li, Q., . . . Chen, J. (2021). Physicochemical properties of pectin extracted from navel orange peel dried by vacuum microwave. *LWT*, 151. doi:10.1016/j.lwt.2021.112100
- Doymaz, İ., & Sahin, M. (2016). Effect of temperature and pre-treatment on drying and rehydration characteristics of broccoli slices. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 10(2), 364-373. doi:10.1007/s11694-016-9315-2
- Dugrand-Judek, A. (2015). *Contribution à l'étude phytochimique et moléculaire de la synthèse des coumarines et furocoumarines chez diverses variétés d'agrumes du genre Citrus*.
- El Mokretar, S., Miri, R., & Belhamel, M. J. R. d. é. R. (2004). Etude du bilan d'énergie et de masse d'un séchoir de type serre applications au séchage des produits agro-alimentaires. 7, 109-123.
- Erbay, Z., & Icier, F. (2010). A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50(5), 441-464. doi:10.1080/10408390802437063
- Evin, D. (2012). Thin layer drying kinetics of Gundelia tournefortii L. *Food and Bioprocess Technology*, 90(2), 323-332. doi:10.1016/j.fbp.2011.07.002
- FAO. (2021). Citrus Fruit Statistical Compendium 2020. In: FAO Rome, Italy.
- Farnworth, E., Lagace, M., Couture, R., Yaylayan, V., & Stewart, B. (2001). Thermal processing, storage conditions, and the composition and physical properties of orange juice. *Food Research International*, 34(1), 25-30.
- Fernando, J., & Amarasinghe, A. (2016). Drying kinetics and mathematical modeling of hot air drying of coconut coir pith. *SpringerPlus*, 5(1), 1-12.
- Floegel, A., Kim, D.-O., Chung, S.-J., Koo, S. I., & Chun, O. K. (2011). Comparison of ABTS/DPPH assays to measure antioxidant capacity in popular antioxidant-rich US foods. *Journal of food composition and analysis*, 24(7), 1043-1048.
- Garau, M. C., Simal, S., Rosselló, C., & Femenia, A. (2007). Effect of air-drying temperature on physico-chemical properties of dietary fibre and antioxidant capacity of orange (*Citrus aurantium* v. *Canoneta*) by-products. *Food Chemistry*, 104(3), 1014-1024. doi:10.1016/j.foodchem.2007.01.009
- Georgé, S., Brat, P., Alter, P., & Amiot, M. J. (2005). Rapid determination of polyphenols and vitamin C in plant-derived products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(5), 1370-1373.
- Georgé, S., Tourniaire, F., Gautier, H., Goupy, P., Rock, E., & Caris-Veyrat, C. (2011). Changes in the contents of carotenoids, phenolic compounds and vitamin C during technical processing and lyophilisation of red and yellow tomatoes. *Food Chemistry*, 124(4), 1603-1611. doi:10.1016/j.foodchem.2010.08.024
- Ghanem, N., Mihoubi, D., Bonazzi, C., Kechaou, N., & Boudhrioua, N. (2018). Drying Characteristics of Lemon By-product (*Citrus limon* v. *lunari*): Effects of Drying Modes

- on Quality Attributes Kinetics'. *Waste and Biomass Valorization*, 11(1), 303-322. doi:10.1007/s12649-018-0381-z
- Goudeau, D., Uratsu, S. L., Inoue, K., Goes daSilva, F., Leslie, A., Cook, D., . . . Dandekar, A. M. (2008). Tuning the orchestra: Selective gene regulation and orange fruit quality. *Plant Science*, 174(3), 310-320.
- Gowen, A. A., Abu-Ghannam, N., Frias, J., & Oliveira, J. (2008). Modeling dehydration and rehydration of cooked soybeans subjected to combined microwave-hot-air drying. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 9(1), 129-137. doi:10.1016/j.ifset.2007.06.009
- Gowen, A. A., O'Sullivan, C., & O'Donnell, C. (2012). Terahertz time domain spectroscopy and imaging: Emerging techniques for food process monitoring and quality control. *Trends in Food Science & Technology*, 25(1), 40-46.
- Guiné, R. P., Pinho, S., & Barroca, M. J. (2011). Study of the convective drying of pumpkin (*Cucurbita maxima*). *Food and Bioprocess Technology*, 89(4), 422-428. doi:10.1016/j.fbp.2010.09.001
- Guo, Q., Sun, D.-W., Cheng, J.-H., Han, Z. J. T. i. F. S., & Technology. (2017). Microwave processing techniques and their recent applications in the food industry. 67, 236-247.
- Hagerman, A. E. (2002). Tannin Handbook. Miami University. *Oxford, OH, Available online at www.users.muohio.edu/hagermae/473, 474, 475-476.*
- Hamidouche, Z., & Belhamiche, N. E. (2017). Activité antagoniste de *Trichoderma* sp vis-à-vis *Botriosphaeria dothidae* agent du dépérissement des Citrus.
- Harish, A., Rashmi, M., Krishna Murthy, T., Blessy, B., & Ananda, S. (2014). Mathematical modeling of thin layer microwave drying kinetics of elephant foot yam (*Amorphophallus paeoniifolius*). *International Food Research Journal*, 21(3), 1081-1087.
- Hidar, N., Ouhammou, M., Mghazli, S., Idlimam, A., Hajjaj, A., Bouchdoug, M., . . . Mahrouz, M. (2020). The impact of solar convective drying on kinetics, bioactive compounds and microstructure of stevia leaves. *Renewable Energy*, 161, 1176-1183.
- Hnin, K. K., Zhang, M., Ju, R., & Wang, B. (2021). A novel infrared pulse-spouted freeze drying on the drying kinetics, energy consumption and quality of edible rose flowers. *LWT*, 136, 110318. doi:10.1016/j.lwt.2020.110318
- Horuz, E., Bozkurt, H., Karataş, H., & Maskan, M. (2017). Drying kinetics of apricot halves in a microwave-hot air hybrid oven. *Heat and Mass Transfer*, 53(6), 2117-2127.
- Inchuen, S., Narkrugsa, W., & Pornchaloempong, P. (2010). Effect of drying methods on chemical composition, color and antioxidant properties of Thai red curry powder. *Agriculture and Natural Resources*, 44(1), 142-151.
- Inyang, U. E., Oboh, I. O., & Etuk, B. R. (2018). Kinetic Models for Drying Techniques—Food Materials. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 08(02), 27-48. doi:10.4236/aces.2018.82003
- Jahanbakhshi, A., Kaveh, M., Taghinezhad, E., & Rasooli Sharabiani, V. (2020). Assessment of kinetics, effective moisture diffusivity, specific energy consumption, shrinkage, and color in the pistachio kernel drying process in microwave drying with ultrasonic pretreatment. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(6). doi:10.1111/jfpp.14449
- Jaiswal, A. K., & Abu-Ghannam, N. (2013). Degradation kinetic modelling of color, texture, polyphenols and antioxidant capacity of York cabbage after microwave processing. *Food research international*, 53(1), 125-133. doi:10.1016/j.foodres.2013.04.007
- Jangam, S. V. (2011). An overview of recent developments and some R&D challenges related to drying of foods. *Drying Technology*, 29(12), 1343-1357.
- Jannot, Y. (2003). Isothermes de sorption: modèles et détermination. *LEPT-ENSAM,(1-5).*

- Jannot, Y. (2008). séminaire de formation à la Métrologie Thermique. *Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (LEMETA), Laboratoire d'Énergie Appliquée (LEA), Dakar, 12.*
- Jarque, J. C., Segarra, C., Cantavella, V., & Mondragón, R. (2015). Non-isothermal modeling of drying kinetics of ceramic tiles. *Drying Technology, 34*(7), 761-772. doi:10.1080/07373937.2015.1076837
- Jayaprakasha, G., & Patil, B. S. (2007). In vitro evaluation of the antioxidant activities in fruit extracts from citron and blood orange. *Food Chemistry, 101*(1), 410-418.
- Jha, P., Meghwal, M., & Prabhakar, P. K. (2021). Microwave drying of banana blossoms (*Musa acuminata*): Mathematical modeling and drying energetics. *Journal of Food Processing and Preservation, 45*(9). doi:10.1111/jfpp.15717
- Julkunen-Tiitto, R., & Sorsa, S. (2001). Testing the effects of drying methods on willow flavonoids, tannins, and salicylates. *Journal of Chemical Ecology, 27*(4), 779-789.
- Kammoun Bejar, A., Ghanem, N., Mihoubi, D., Kechaou, N., & Boudhrioua Mihoubi, N. (2011). Effect of Infrared Drying on Drying Kinetics, Color, Total Phenols and Water and Oil Holding Capacities of Orange (*Citrus Sinensis*) Peel and Leaves. *International Journal of Food Engineering, 7*(5). doi:10.2202/1556-3758.2222
- Kavak Akpinar, E., Bicer, Y., & Cetinkaya, F. (2006). Modelling of thin layer drying of parsley leaves in a convective dryer and under open sun. *Journal of Food Engineering, 75*(3), 308-315. doi:10.1016/j.jfoodeng.2005.04.018
- Kaveh, M., Abbaspour-Gilandeh, Y., & Nowacka, M. (2021). Optimisation of microwave-rotary drying process and quality parameters of terebinth. *Biosystems Engineering, 208*, 113-130.
- Kaveh, M., & Amiri Chayjan, R. (2017). Modeling thin-layer drying of turnip slices under semi-industrial continuous band dryer. *Journal of Food Processing and Preservation, 41*(2), e12778. doi:10.1111/jfpp.12778
- Kaya, A., Aydın, O., & Kolaylı, S. (2010). Effect of different drying conditions on the vitamin C (ascorbic acid) content of Hayward kiwifruits (*Actinidia deliciosa* Planch). *Food and Bioproducts Processing, 88*(2-3), 165-173. doi:10.1016/j.fbp.2008.12.001
- Kayisoglu, S., & Ertekin, C. (2011). Vacuum drying kinetics of barbunya bean (*Phaseolus vulgaris* L. ellipticus Mart.). *The Philippine Agricultural Scientist, 94*(3).
- Kelebek, H., Canbas, A., & Selli, S. (2008). Determination of phenolic composition and antioxidant capacity of blood orange juices obtained from cvs. Moro and Sanguinello (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) grown in Turkey. *Food Chemistry, 107*(4), 1710-1716. doi:10.1016/j.foodchem.2007.10.004
- Kesbi, O. M., Sadeghi, M., & Mireei, S. A. (2016). Quality assessment and modeling of microwave-convective drying of lemon slices. *Engineering in agriculture, environment and food, 9*(3), 216-223. doi:10.1016/j.eaef.2015.12.003
- Khazaei, J., & Daneshmandi, S. (2007). Modeling of thin-layer drying kinetics of sesame seeds: mathematical and neural networks modeling. *International Agrophysics, 21*(4), 335-348.
- Khenouf, S., Iratni, N., Baghiani, A. H. D., & Arrar, L. (2010). Antioxidant and antibacterial activities of extracts from *Artemisia herba alba* Asso. leaves and some phenolic compounds. *Journal of medicinal plants Research, 4*(13), 1273-1280.
- Kim, D.-O., Lee, K. W., Lee, H. J., & Lee, C. Y. (2002). Vitamin C equivalent antioxidant capacity (VCEAC) of phenolic phytochemicals. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 50*(13), 3713-3717.
- Klein, B., & Perry, A. (1982). Ascorbic acid and vitamin A activity in selected vegetables from different geographical areas of the United States. *Journal of food science, 47*(3), 941-945.

- Klimczak, I., Małecka, M., Szlachta, M., & Gliszczyńska-Świąło, A. (2007). Effect of storage on the content of polyphenols, vitamin C and the antioxidant activity of orange juices. *Journal of food composition and analysis*, 20(3-4), 313-322. doi:10.1016/j.jfca.2006.02.012
- Köhler, F. E. (1887). *Köhler's Medizinal-Pflanzen in naturgetreuen Abbildungen mit kurz erläuterndem Texte: Atlas zur Pharmacopoea germanica, austriaca, belgica, danica, helvetica, hungarica, rossica, suecica, Neerlandica, British pharmacopoeia, zum Codex medicamentarius, sowie zur Pharmacopoeia of the United States of America* (Vol. 1): FE Köhler.
- Kouhila, M., Moussaoui, H., Lamsyehe, H., Tagnamas, Z., Bahammou, Y., Idlimam, A., & Lamharrar, A. (2020). Drying characteristics and kinetics solar drying of Mediterranean mussel (*mytilus galloprovincialis*) type under forced convection. *Renewable Energy*, 147, 833-844. doi:10.1016/j.renene.2019.09.055
- Kubalt, K. (2016). The role of phenolic compounds in plant resistance.
- Kubra, I. R., & Jagan Mohan Rao, L. (2012). Microwave drying of ginger (*Zingiber officinale* Roscoe) and its effects on polyphenolic content and antioxidant activity. *International Journal of Food Science & Technology*, 47(11), 2311-2317. doi:10.1111/j.1365-2621.2012.03104.x
- Kwok, B., Hu, C., Durance, T., & Kitts, D. (2004). Dehydration techniques affect phytochemical contents and free radical scavenging activities of Saskatoon berries (*Amelanchier alnifolia* Nutt.). *Journal of food science*, 69(3), SNQ122-SNQ126.
- Lagha-Benamrouche, S., Addar, L., Boudershem, H., Tani, S., & Madani, K. (2018). Caractérisation chimiques des écorces d'oranges, identification par GC-MS et évaluation du pouvoir antioxydant de leurs huiles essentielles. *Nature & Technology*(18), 28-35.
- Lagha-Benamrouche, S., & Madani, K. (2013). Phenolic contents and antioxidant activity of orange varieties (*Citrus sinensis* L. and *Citrus aurantium* L.) cultivated in Algeria: Peels and leaves. *Industrial Crops and Products*, 50, 723-730. doi:10.1016/j.indcrop.2013.07.048
- 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.
- Lee, H., Carter, R., Barros, S., Dezman, D., & Castle, W. (1990). Chemical characterization by liquid chromatography of Moro blood orange juices. *Journal of food composition and analysis*, 3(1), 9-19.
- Lee, J., Durst, R. W., Wrolstad, R. E., Kupina, C. E. T. G. M. H. J. H. H. K. S. K. D., & JD, S. M. S. M. B. M. T. P. F. R. A. S. G. T. U. W. (2005). Determination of total monomeric anthocyanin pigment content of fruit juices, beverages, natural colorants, and wines by the pH differential method: collaborative study. *Journal of AOAC international*, 88(5), 1269-1278.
- Li, M., Chen, X., Deng, J., Ouyang, D., Wang, D., Liang, Y., . . . Sun, Y. (2020). Effect of thermal processing on free and bound phenolic compounds and antioxidant activities of hawthorn. *Food Chem*, 332, 127429. doi:10.1016/j.foodchem.2020.127429
- Li, Z., Raghavan, G., Wang, N., & Vigneault, C. (2011). Drying rate control in the middle stage of microwave drying. *Journal of food engineering*, 104(2), 234-238.
- Lin, T. M., Durance, T. D., & Scaman, C. H. (1998). Characterization of vacuum microwave, air and freeze dried carrot slices. *Food research international*, 31(2), 111-117.
- Liu, Y., Heying, E., & Tanumihardjo, S. A. (2012). History, global distribution, and nutritional importance of citrus fruits. *Comprehensive reviews in Food Science and Food safety*, 11(6), 530-545.

- Lo Piero, A. R. (2015). The State of the Art in Biosynthesis of Anthocyanins and Its Regulation in Pigmented Sweet Oranges [(Citrus sinensis) L. Osbeck]. *J Agric Food Chem*, 63(16), 4031-4041. doi:10.1021/acs.jafc.5b01123
- Lo Scalzo, R., Iannocari, T., Summa, C., Morelli, R., & Rapisarda, P. (2004). Effect of thermal treatments on antioxidant and antiradical activity of blood orange juice. *Food Chemistry*, 85(1), 41-47. doi:10.1016/j.foodchem.2003.05.005
- López, J., Uribe, E., Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Vergara, J., Gonzalez, E., & Di Scala, K. (2010). Effect of air temperature on drying kinetics, vitamin C, antioxidant activity, total phenolic content, non-enzymatic browning and firmness of blueberries variety O Neil. *Food and Bioprocess Technology*, 3, 772-777.
- Loubna, K. A. M., & Sara, B. (2018). Inventaire des insectes ravageurs dans quelques vergers d'agrumes dans la région de Guelma.
- Loussert, R. (1989). *Les agrumes: Technique et Documentation-Lavoisier*.
- Lu, Q., Peng, Y., Zhu, C., & Pan, S. (2018). Effect of thermal treatment on carotenoids, flavonoids and ascorbic acid in juice of orange cv. Cara Cara. *Food Chem*, 265, 39-48. doi:10.1016/j.foodchem.2018.05.072
- Lüle, F., & Koyuncu, T. (2015). Convective and microwave drying characteristics of sorbus fruits (*Sorbus domestica* L.). *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 195, 2634-2643.
- M'Hiri, N. (2015). *Étude comparative de l'effet des méthodes d'extraction sur les phénols et l'activité antioxydante des extraits des écorces de l'orange «Maltaise demi sanguine» et exploration de l'effet inhibiteur de la corrosion de l'acier au carbone*. Université de Lorraine,
- M'hiri, N., Ioannou, I., Ghoul, M., & Mihoubi Boudhrioua, N. (2016). Phytochemical characteristics of citrus peel and effect of conventional and nonconventional processing on phenolic compounds: A review. *Food Reviews International*, 33(6), 587-619. doi:10.1080/87559129.2016.1196489
- Maftoonazad, N., Dehghani, M. R., & Ramaswamy, H. S. (2020). Hybrid microwave-hot air tunnel drying of onion slices: Drying kinetics, energy efficiency, product rehydration, color, and flavor characteristics. *Drying Technology*, 1-21. doi:10.1080/07373937.2020.1841790
- Makkar, H. (2003). Effects and fate of tannins in ruminant animals, adaptation to tannins, and strategies to overcome detrimental effects of feeding tannin-rich feeds. *Small ruminant research*, 49(3), 241-256.
- Manach, C., Scalbert, A., Morand, C., Rémésy, C., & Jiménez, L. (2004). Polyphenols: food sources and bioavailability. *The American journal of clinical nutrition*, 79(5), 727-747.
- Marinos-Kouris, D., & Maroulis, Z. (2006). Transport Properties in the Drying of Solids. doi:10.1201/9781420017618.ch4
- Mbegbu, N., Nwajinka, C., & Amaefule, D. (2021). Thin layer drying models and characteristics of scent leaves (*Ocimum gratissimum*) and lemon basil leaves (*Ocimum africanum*). *Heliyon*, 7(1), e05945.
- Mierzwa-Hersztek, M., Gondek, K., Nawrocka, A., Pińkowska, H., Bajda, T., Stanek-Tarkowska, J., & Szostek, M. J. J. o. E. (2019). FT-IR analysis and the content of phenolic compounds in exogenous organic matter produced from plant biomass. 24(3).
- Miraei Ashtiani, S.-H., Rafiee, M., Mohebi Morad, M., & Martynenko, A. (2022). Cold plasma pretreatment improves the quality and nutritional value of ultrasound-assisted convective drying: The case of goldenberry. *Drying Technology*, 1-19.
- Mokrani, A., & Madani, K. (2016). Effect of solvent, time and temperature on the extraction of phenolic compounds and antioxidant capacity of peach (*Prunus persica* L.) fruit. *Separation and Purification Technology*, 162, 68-76.

- Monteiro, R. L., Carciofi, B. A., & Laurindo, J. B. (2016). A microwave multi-flash drying process for producing crispy bananas. *Journal of Food Engineering*, 178, 1-11.
- Moses, J. A., Norton, T., Alagusundaram, K., & Tiwari, B. K. (2014). Novel Drying Techniques for the Food Industry. *Food Engineering Reviews*, 6(3), 43-55. doi:10.1007/s12393-014-9078-7
- Motevali, A., Minaei, S., Banakar, A., Ghobadian, B., & Darvishi, H. (2016). Energy analyses and drying kinetics of chamomile leaves in microwave-convective dryer. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 15(2), 179-187.
- Mouhoubi, K., Boulekbache-Makhlouf, L., Guendouze-Bouchefa, N., Freidja, M. L., Romero, A., & Madani, K. (2020). Modelling of drying kinetics and comparison of two processes: forced convection drying and microwave drying of celery leaves (*Apium graveolens* L.). *The Annals of the University Dunarea de Jos of Galati Fascicle VI – Food Technology*, 44(1), 48-69. doi:10.35219/foodtechnology.2019.2.04
- Mouhoubi, K., Boulekbache-Makhlouf, L., Madani, K., Palatzidi, A., Perez-Jimenez, J., Mateos-Aparicio, I., & Garcia-Alonso, A. (2022). Phenolic compounds and antioxidant activity are differentially affected by drying processes in celery, coriander and parsley leaves. *International Journal of Food Science & Technology*, 57(6), 3467-3476. doi:10.1111/ijfs.15670
- MUHCEN, M. C., ALI, H. A., & MALK, F. H. (2022). MODIFICATION OF WASTE POLYSTYRENE AND INVESTIGATION OF ITS CONDUCTIVE CHARACTERISTICS WITH THE ADDITION OF ANTHOCANDIEN PIGMENT DERIVED FROM EGGPLANT PEEL. *International Journal of Applied Sciences and Technology*.
- Murthy, T. P. K., & Manohar, B. (2014). Hot air drying characteristics of mango ginger: Prediction of drying kinetics by mathematical modeling and artificial neural network. *Journal of Food Science and Technology*, 51(12), 3712-3721.
- Mwale, S., Azam-Ali, S., & Massawe, F. (2007). Growth and development of bambara groundnut (*Vigna subterranea*) in response to soil moisture: 1. Dry matter and yield. *European journal of agronomy*, 26(4), 345-353.
- Naderinezhad, S., Etesami, N., Poormalek Najafabady, A., & Ghasemi Falavarjani, M. (2016). Mathematical modeling of drying of potato slices in a forced convective dryer based on important parameters. *Food science & nutrition*, 4(1), 110-118.
- Naidu, M. M., Vedashree, M., Satapathy, P., Khanum, H., Ramsamy, R., & Hebbar, H. U. (2016). Effect of drying methods on the quality characteristics of dill (*Anethum graveolens*) greens. *Food Chemistry*, 192, 849-856.
- Nazmi IZLI, G. I., Onur TASKIN. (2017). Influence of different drying techniques on drying parameters of mango. *Food Science and Technology*. doi:10.1590/1678-457X.28316
- Nguyen, T. H. (2015). *Étude expérimentale et modélisation du procédé de séchage des végétaux*. Université de Bretagne Sud,
- Nicolas, J. (2014). *Phase exploratoire à la mise en place d'un schéma d'approvisionnement de plants d'agrumes sains et authentiques en Guyane*. ISTOM,
- Nisha, P., Nazar, P. A., & Jayamurthy, P. (2009). A comparative study on antioxidant activities of different varieties of *Solanum melongena*. *Food and Chemical Toxicology*, 47(10), 2640-2644.
- Novelli, V. M., Cristofani, M., Souza, A. A., & Machado, M. A. (2006). Development and characterization of polymorphic microsatellite markers for the sweet orange (*Citrus sinensis* L. Osbeck). *Genetics and Molecular Biology*, 29(1), 90-96.
- Olawoye, B. T., Kadiri, O., Babalola, T. R., & Yildiz, F. (2017). Modelling of thin-layer drying characteristic of unripe Cardaba banana (*Musa ABB*) slices. *Cogent Food & Agriculture*, 3(1). doi:10.1080/23311932.2017.1290013

- Omid, M., Yadollahinia, A., & Rafiee, S. (2006). *A thin-layer drying model for paddy dryer*. Paper presented at the Proceedings of the International conference on Innovations in Food and Bioprocess Technologies, 12th–14th December, AIT, Pathumthani, Thailand.
- Omoba, O. S., Obafaye, R. O., Salawu, S. O., Boligon, A. A., & Athayde, M. L. (2015). HPLC-DAD phenolic characterization and antioxidant activities of ripe and unripe sweet orange peels. *Antioxidants*, 4(3), 498-512.
- Onwude, D. I., Hashim, N., Janius, R. B., Nawi, N. M., & Abdan, K. (2016). Modeling the Thin-Layer Drying of Fruits and Vegetables: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(3), 599-618. doi:10.1111/1541-4337.12196
- Onwude, D. I., Hashim, N., Janius, R. B., Nawi, N. M., & Abdan, K. (2016). Modeling the thin-layer drying of fruits and vegetables: A review. *Comprehensive reviews in Food Science and Food safety*, 15(3), 599-618.
- Orsine, J. V. C., da Costa, R. V., da Silva, R. C., Santos, M., & Novaes, M. (2012). The acute cytotoxicity and lethal concentration (LC50) of *Agaricus sylvaticus* through hemolytic activity on human erythrocyte. *Int J Nutr Metab January*, 4(11), 19-23.
- Ou, B., Huang, D., Hampsch-Woodill, M., Flanagan, J. A., & Deemer, E. K. (2002). Analysis of antioxidant activities of common vegetables employing oxygen radical absorbance capacity (ORAC) and ferric reducing antioxidant power (FRAP) assays: a comparative study. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(11), 3122-3128.
- Oyedapo, O., & Famurewa, A. J. (1995). Antiprotease and membrane stabilizing activities of extracts of *Fagara zanthoxyloides*, *Olox subscorpioides* and *Tetrapleura tetraptera*. *International journal of Pharmacognosy*, 33(1), 65-69.
- Özbek, B., & Dadali, G. (2007). Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment. *Journal of Food Engineering*, 83(4), 541-549. doi:10.1016/j.jfoodeng.2007.04.004
- Pagano, M., & Faggio, C. (2015). The use of erythrocyte fragility to assess xenobiotic cytotoxicity. *Cell Biochem Funct*, 33(6), 351-355. doi:10.1002/cbf.3135
- Panchariya, P., Popovic, D., & Sharma, A. (2002). Thin-layer modelling of black tea drying process. *Journal of Food Engineering*, 52(4), 349-357.
- Panche, A. N., Diwan, A. D., & Chandra, S. R. (2016). Flavonoids: an overview. *J Nutr Sci*, 5, e47. doi:10.1017/jns.2016.41
- Pérez-Jiménez, J., & Saura-Calixto, F. (2006). Effect of solvent and certain food constituents on different antioxidant capacity assays. *Food research international*, 39(7), 791-800.
- Perino, S., & Chemat, F. (2015). Chauffage micro-ondes comme éco-procédé en industrie agroalimentaire.
- Praloran, J. (1971). *Les Agrumes, Techniques Agricoles et Production Tropicale*. Ed. GP Maisonneuve et Larose, Paris, 565p.
- Que, F., Mao, L., Fang, X., & Wu, T. (2008). Comparison of hot air-drying and freeze-drying on the physicochemical properties and antioxidant activities of pumpkin (*Cucurbita moschata* Duch.) flours. *International Journal of Food Science & Technology*, 43(7), 1195-1201. doi:10.1111/j.1365-2621.2007.01590.x
- Radoiu, M. (2020). Microwave drying process scale-up. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 155. doi:10.1016/j.cep.2020.108088
- Ralph, A., Ferreira, S., Ferreira, V., Lima, E., & Vasconcellos, M. (2009). Avaliação da citotoxicidade de naftoquinonas sintéticas em modelo de *Artemia franciscana* e eritrócitos. *Resumo apresentado na 61ª Reunião Anual da SBPC*.
- Ramful, D., Baborun, T., Bourdon, E., Tarnus, E., & Aruoma, O. I. (2010). Bioactive phenolics and antioxidant propensity of flavedo extracts of Mauritian citrus fruits: potential prophylactic ingredients for functional foods application. *Toxicology*, 278(1), 75-87. doi:10.1016/j.tox.2010.01.012

- Rapisarda, P., Bianco, M. L., Pannuzzo, P., & Timpanaro, N. (2008). Effect of cold storage on vitamin C, phenolics and antioxidant activity of five orange genotypes [Citrus sinensis (L.) Osbeck]. *Postharvest Biology and Technology*, 49(3), 348-354.
- Rapisarda, P., Tomaino, A., Lo Cascio, R., Bonina, F., De Pasquale, A., & Saija, A. (1999). Antioxidant effectiveness as influenced by phenolic content of fresh orange juices. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47(11), 4718-4723.
- Rathinavel, S., & Saravanakumar, S. J. J. o. N. F. (2021). Development and Analysis of Poly Vinyl Alcohol/Orange peel powder biocomposite films. 18(12), 2045-2054.
- Ratti, C. (2008). *Advances in food dehydration*: CRC Press.
- Reyes, A., Ceron, S., Zuniga, R., & Moyano, P. (2007). A comparative study of microwave-assisted air drying of potato slices. *Biosystems Engineering*, 98(3), 310-318.
- Romero-Díez, R., Rodríguez-Rojo, S., Cocero, M. J., Duarte, C. M., Matias, A. A., & Bronze, M. R. (2018). Phenolic characterization of aging wine lees: Correlation with antioxidant activities. *Food Chemistry*, 259, 188-195.
- ROUSSY, G., ROCHAS, J.-F., & OBERLIN, C. (2003). Chauffage diélectrique: Technologies. *Techniques de l'ingénieur. Génie électrique*, 12(D5941), D5941. 5941-D5941. 5915.
- Sabarez, H. (2016). Airborne ultrasound for convective drying intensification. In *Innovative food processing technologies* (pp. 361-386): Elsevier.
- Sabarez, H. T. (2016). Airborne Ultrasound for Convective Drying Intensification. 361-386. doi:10.1016/b978-0-08-100294-0.00014-6
- Saeed, I., Sopian, K., & Abidin, Z. Z. (2008). Drying characteristics of Roselle (1): mathematical modeling and drying experiments. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*.
- Salem, H. B., Nefzaoui, A., Salem, L. B., Ferchichi, H., & Tisserand, J. (1997). *Intake and digestion in sheep given fresh or air-dried Acacia cyanophylla Lindl foliage*. Paper presented at the Annales de zootechnie.
- Sarkar, T., Salauddin, M., Hazra, S. K., & Chakraborty, R. (2020). Effect of cutting edge drying technology on the physicochemical and bioactive components of mango (Langra variety) leather. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2. doi:10.1016/j.jafr.2020.100074
- Schieber, A., Keller, P., & Carle, R. (2001). Determination of phenolic acids and flavonoids of apple and pear by high-performance liquid chromatography. *Journal of Chromatography A*, 910(2), 265-273.
- Schnell, D. (1983). Technique de séchage. *Traduit de l'allemand, GMBH, Eschborn*.
- Sengar, S., Mohod, A., Khandetod, Y., Shrirame, H., & Deshmukh, A. (2012). Performance evaluation of kiln for cashew nut shell carbonization and liquid. *Int. J. Energy Eng*, 2, 78-85.
- Sharma, K., Mahato, N., Cho, M. H., & Lee, Y. R. (2017). Converting citrus wastes into value-added products: Economic and environmently friendly approaches. *Nutrition*, 34, 29-46.
- Singleton, V. L., & Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American journal of Enology and Viticulture*, 16(3), 144-158.
- Sledz, M., Wiktor, A., Nowacka, M., & Witrowa-Rajchert, D. (2017). Drying Kinetics, Microstructure and Antioxidant Properties of Basil Treated by Ultrasound. *Journal of Food Process Engineering*, 40(1). doi:10.1111/jfpe.12271
- Sledz, M., Wiktor, A., Rybak, K., Nowacka, M., & Witrowa-Rajchert, D. (2016). The impact of ultrasound and steam blanching pre-treatments on the drying kinetics, energy consumption and selected properties of parsley leaves. *Applied Acoustics*, 103, 148-156. doi:10.1016/j.apacoust.2015.05.006

- Srikiatden, J., & Roberts, J. S. (2007). Moisture Transfer in Solid Food Materials: A Review of Mechanisms, Models, and Measurements. *International Journal of Food Properties*, 10(4), 739-777. doi:10.1080/10942910601161672
- Sugumaran, P., Susan, V. P., Ravichandran, P., Seshadri, S. J. J. o. S. E., & Environment. (2012). Production and characterization of activated carbon from banana empty fruit bunch and Delonix regia fruit pod. 3(3), 125-132.
- Talens, C., Castro-Giraldez, M., & Fito, P. J. (2016). A thermodynamic model for hot air microwave drying of orange peel. *Journal of Food Engineering*, 175, 33-42.
- Tasirin, S. M., Puspasari, I., Sahalan, A. Z., Mokhtar, M., Ghani, M. K. A., & Yaakob, Z. (2014). Drying of Citrus sinensis Peels in an Inert Fluidized Bed: Kinetics, Microbiological Activity, Vitamin C, and Limonene Determination. *Drying Technology*, 32(5), 497-508. doi:10.1080/07373937.2013.838782
- Tepe, B., Eminagaoglu, O., Akpulat, H. A., & Aydin, E. (2007). Antioxidant potentials and rosmarinic acid levels of the methanolic extracts of Salvia verticillata (L.) subsp. verticillata and S. verticillata (L.) subsp. amasiaca (Freyn & Bornm.) Bornm. *Food Chemistry*, 100(3), 985-989.
- Tsotsas, E., & Mujumdar, A. S. (2014). *Modern Drying Technology, Volume 5: Process Intensification* (Vol. 5): John Wiley & Sons.
- VASSEUR, J. (2009). Séchage: principes et calcul d'appareils-Séchage convectif par air chaud (partie 1).
- Vega-Gálvez, A., Di Scala, K., Rodríguez, K., Lemus-Mondaca, R., Miranda, M., López, J., & Perez-Won, M. (2009). Effect of air-drying temperature on physico-chemical properties, antioxidant capacity, colour and total phenolic content of red pepper (Capsicum annuum, L. var. Hungarian). *Food Chemistry*, 117(4), 647-653. doi:10.1016/j.foodchem.2009.04.066
- Velasco, D., Senit, J. J., De la Torre, I., Santos, T. M., Yustos, P., Santos, V. E., & Ladero, M. (2017). Optimization of the enzymatic saccharification process of milled orange wastes. *Fermentation*, 3(3), 37.
- Vian, M. A., Maingonnat, J. F., & Chemat, F. (2009). Clean recovery of antioxidant flavonoids from onions: Optimising solvent free microwave extraction method. *Journal of Chromatography A*, 1216(45), 7700-7707.
- Vitti, D. M. S. S., Nozella, E. F., Abdalla, A. L., Bueno, I. C. S., Filho, J. C. S., Costa, C., . . . Mueller-Harvey, I. (2005). The effect of drying and urea treatment on nutritional and anti-nutritional components of browses collected during wet and dry seasons. *Animal Feed Science and Technology*, 122(1-2), 123-133. doi:10.1016/j.anifeedsci.2005.04.007
- Wang, Y., Li, X., Chen, X., Li, B., Mao, X., Miao, J., . . . Gao, W. (2018). Effects of hot air and microwave-assisted drying on drying kinetics, physicochemical properties, and energy consumption of chrysanthemum. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 129, 84-94.
- Wilhelm, L. R., Suter, D. A., & Brusewitz, G. H. (2004). *Food & process engineering technology*.
- Yan, F., Fan, K., He, J., & Gao, M. (2015). Ultrasonic-assisted solvent extraction of carotenoids from rapeseed meal: optimization using response surface methodology. *Journal of Food Quality*, 38(6), 377-386.
- Yang, B., Kotani, A., Arai, K., & Kusu, F. (2001). Estimation of the antioxidant activities of flavonoids from their oxidation potentials. *Analytical sciences*, 17(5), 599-604.
- Yen, C. E., Yen, C. H., Huang, M. C., Cheng, C. H., & Huang, Y. C. (2008). Dietary intake and nutritional status of vegetarian and omnivorous preschool children and their parents in Taiwan. *Nutr Res*, 28(7), 430-436. doi:10.1016/j.nutres.2008.03.012

- Yildiz, G., & İzli, G. (2019). Influence of microwave and microwave-convective drying on the drying kinetics and quality characteristics of pomelo. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(6), e13812. doi:10.1111/jfpp.13812
- Zannou, O., Pashazadeh, H., Ghellam, M., Hassan, A. M. A., & Koca, I. (2021). Optimization of drying temperature for the assessment of functional and physical characteristics of autumn olive berries. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(9). doi:10.1111/jfpp.15658
- Zarein, M., Samadi, S. H., & Ghobadian, B. (2015). Investigation of microwave dryer effect on energy efficiency during drying of apple slices. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 14(1), 41-47.
- Zhang, Q.-A., Song, Y., Wang, X., Zhao, W.-Q., & Fan, X.-H. (2016). Mathematical modeling of debittered apricot (*Prunus armeniaca* L.) kernels during thin-layer drying. *CyTA-Journal of Food*, 14(4), 509-517.
- Zhu, J.-F., Liu, J.-Z., Wu, J.-H., Cheng, J., Zhou, J.-H., & Cen, K.-F. (2015). Thin-layer drying characteristics and modeling of Ximeng lignite under microwave irradiation. *Fuel Processing Technology*, 130, 62-70. doi:10.1016/j.fuproc.2014.09.033
- Zielinska, M., & Markowski, M. (2016). The influence of microwave-assisted drying techniques on the rehydration behavior of blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.). *Food Chemistry*, 196, 1188-1196.
- Zogzas, N., Maroulis, Z., & Marinos-Kouris, D. (1996). Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. *Drying Technology*, 14(10), 2225-2253. doi:10.1080/07373939608917205

Résumé

En raison de la grande variabilité des techniques de séchage, il est difficile de concevoir le meilleur procédé pour un produit donné. Lors du choix d'un procédé, plusieurs paramètres doivent être pris en compte, notamment un contrôle précis du procédé, un temps de séchage court, une faible consommation d'énergie et un rendement énergétique élevé tout en conservant la qualité du produit. L'orange sanguine est une variété saisonnière, pour la rendre disponible, le séchage est l'une des techniques les plus utilisées. Ainsi, l'objectif de cette étude était exploré pour la première fois l'effet de deux procédés de séchage sur les oranges sanguines algériennes (*Citrus sinensis [L.] Osbeck*) : micro-ondes (200, 400, 600, 800 et 1000W) et convectif (40, 60, 80, 100 et 120°C), sur les caractéristiques de séchage, la modélisation des cinétiques, ainsi que l'évaluation de la composition phyto-chimique et certaines activités biologiques.

Le temps de séchage a été réduit de 90 minutes à 120°C (taux de $2,00 \times 10^{-2}$ KgH₂O/Kg dm.min) à 12 minutes à une sortie micro-ondes de 1000W (taux de $28,86 \times 10^{-2}$ KgH₂O/Kg dm.min). Les données de séchage ont été ajustées à 38 modèles. Les modèles de Sledz et al, et de Midilli et Kucuk se sont avérés les mieux adaptés pour décrire la cinétique de séchage par micro-onde et étuve, respectivement. La diffusivité effective était comprise entre $2,07 \times 10^{-9}$ et $15,67 \times 10^{-9}$ m²/s pour les micro-ondes et entre $0,07 \times 10^{-9}$ et $1,97 \times 10^{-9}$ m²/s pour le séchage convectif. L'énergie d'activation a été estimée à 8,871W/g et 33,7kJ/mol pour les micro-ondes et la convection respectivement. La consommation d'énergie la plus élevée a été obtenue par le séchage convectif ($0,49 \times 10^7$ MJ/KgH₂O) tandis que le rendement énergétique le plus élevé a été obtenu par le séchage par micro-ondes ($36,93 \times 10^{-2}$ %).

En ce qui concerne les composés bioactifs, les valeurs les plus élevées en acide ascorbique, contenu phénolique total, flavonoïdes, tannins, anthocyanes ainsi des activités antioxydantes (ABTS et DPPH et FRAP) ont été observées pendant le séchage par micro-ondes.

Les résultats de cette recherche ont permis de sélectionner la technique innovante (micro-ondes) qui offre un séchage plus rapide, une faible consommation d'énergie et un rendement énergétique élevé, pour produire des tranches d'orange déshydratées tout en maintenant leur qualité phyto-chimique, qui pourraient être utiles pour faciliter leur utilisation hors saison dans la formulation de différents produits alimentaires, l'enrichissement des aliments et l'industrie pharmaceutique.

Mots-clés : *Citrus sinensis [L.] Osbeck*, cinétique de séchage, consommation d'énergie, rendement énergétique, paramètres cinétiques, modélisation, contenu phénolique, flavonoïdes.

Summary

Due to the wide variability of drying techniques, it is difficult to design the best process for a given product. When selecting a process, several parameters must be considered, including precise process control, short drying time, low energy consumption and high energy efficiency while maintaining product quality. Blood orange is a seasonal variety, to make it available, drying is one of the most used techniques. Thus, the objective of this study was to explore for the first time the effect of two drying processes on Algerian blood oranges (*Citrus sinensis* [L.] Osbeck): microwave (200, 400, 600, 800 and 1000W) and convective (40, 60, 80, 100 and 120°C), on the drying characteristics, modeling of kinetics, as well as the evaluation of the phytochemical composition and some biological activities.

The drying time was reduced from 90 minutes at 120°C (rate of 2.00×10^{-2} KgH₂O/Kg dm.min) to 12 minutes at 1000W microwave output (rate of 28.86×10^{-2} KgH₂O/Kg dm.min). The drying data were fitted to 38 models. The models of Sledz et al, and Midilli and Kucuk were found to best describe microwave and oven drying kinetics, respectively. The effective diffusivity ranged from 2.07×10^{-9} to 15.67×10^{-9} m²/s for microwave and from 0.07×10^{-9} to 1.97×10^{-9} m²/s for convective drying. The activation energy was estimated to be 8.871W/g and 33.7kJ/mol for microwave and convective respectively. The highest energy consumption was obtained by convective drying (0.49×10^7 MJ/KgH₂O) while the highest energy yield was obtained by microwave drying (36.93×10^{-2} %).

Regarding the bioactive compounds, the highest values of ascorbic acid, total phenolic content, flavonoids, tannins, anthocyanins as well as antioxidant activities (ABTS and DPPH and FRAP) were observed during microwave drying.

The results of this research allowed the selection of the innovative technique (microwave) that offers faster drying, low energy consumption and high energy efficiency, to produce dehydrated orange slices while maintaining their phytochemical quality, which could be useful to facilitate their off-season use in the formulation of different food products, food fortification and pharmaceutical industry.

Keywords: *Citrus sinensis* [L.] Osbeck, drying kinetics, energy consumption, energy yield, kinetic parameters, modeling, phenolic content, flavonoids.

ملخص

نظراً للتنوع الكبير في تقنيات التجفيف، من الصعب تصميم أفضل عملية لمنتج معين. عند اختيار العملية، يجب مراعاة العديد من المعلمات، بما في ذلك التحكم الدقيق في العملية ووقت التجفيف القصير والاستهلاك المنخفض للطاقة وكفاءة الطاقة العالية مع الحفاظ على جودة المنتج. برتقال الدم هو صنف موسمي، لجعله متاحاً، التجفيف هو أحد الأساليب الأكثر استخداماً. وهكذا، تم استكشاف الهدف من هذه الدراسة لأول مرة تأثير عمليتي تجفيف على برتقال الدم الجزائري (*Citrus sinensis [L.] Osbeck*) الموجات الدقيقة (200، 400، 600، 800 و1000 واط) والحمل الحراري (40، 60، 80، 100 و120 درجة مئوية)، حول خصائص التجفيف، ونمذجة الخواص الحركية، وكذلك تقييم التركيب الكيميائي النباتي وأنشطة بيولوجية معينة.

تم تقليل وقت التجفيف من 90 دقيقة عند 120 درجة مئوية بمعدل 2×10^{-2} كجم H_2O /كجم مادة جافة. د إلى 12 دقيقة عند خرج ميكروويف 1000 واط) بمعدل 2×10^{-2} كجم H_2O /كجم مادة جافة. د. تم تركيب بيانات التجفيف على 38 موديل. ثبت أن نماذج Sledz et al و Midilli و Kucuk هي الأنسب لوصف حركية التجفيف بواسطة الميكروويف والفرن على التوالي. كان الانتشار الفعال بين 2.07×10^{-9} م² / ثانية لأفران الميكروويف وبين 0.07×10^{-9} م² / ثانية للتجفيف بالحمل الحراري. قدرت طاقة التنشيط بـ 8.87 واط / غ و 33.7 كيلوجول/مول للميكروويف والحمل الحراري على التوالي. تم تحقيق أعلى استهلاك للطاقة عن طريق التجفيف بالحمل الحراري (10×0.49 ميقاجول /كجم H_2O) بينما تم تحقيق أعلى إنتاجية للطاقة عن طريق التجفيف بالميكروويف (10×36.93 %).

فيما يتعلق بالمركبات النشطة بيولوجياً، لوحظت أعلى قيم لحمض الأسكوربيك والمحتوى الفينولي الكلي والفلافونويد والعص والأنتوسيانين وكذلك الأنشطة المضادة للأكسدة (ABTS و DPPH و FRAP) أثناء التجفيف بالميكروويف. أتاحت نتائج هذا البحث اختيار التقنية المبتكرة (أفران الميكروويف) التي توفر تجفيفاً أسرع واستهلاكاً منخفضاً للطاقة وإنتاجية عالية للطاقة، لإنتاج شرائح برتقالية مجففة مع الحفاظ على جودتها النباتية. - كيميائية، والتي يمكن أن تكون مفيدة لتسهيلها الاستخدام في غير موسمها في صياغة المنتجات الغذائية المختلفة وإغناء الأغذية وصناعة الأدوية.

الكلمات المفتاحية: *Citrus sinensis [L.] Osbeck* حركية التجفيف، استهلاك الطاقة، إنتاجية الطاقة، البارامترات الحركية، النمذجة، المحتوى الفينولي، الفلافونويد.