

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hadj Lakhdar Batna 1
Institut des Sciences Vétérinaires et
des Sciences Agronomiques
Département de Technologie Alimentaire



جامعة الحاج لخضر-باتنة 1
معهد العلوم البيطرية والعلوم الفلاحية
قسم تكنولوجيا التغذية

N°...../ISVSA/DTA/2021

Thèse

Présenté par

BRIKI Samia

Pour l'obtention du diplôme de

Doctorat 3^{ème} cycle (LMD)

Spécialité: Sciences des aliments

Thème

**Effet des techniques de conservation
sur la qualité de la grenade**

Devant le Jury:

Président	Prof. FAHLOUL Djamel	Professeur	Université de Batna 1
Directeur	Prof. ZITOUNI Bariza	Professeur	Université de Batna 1
Co-Directeur	Prof. AMIALI Malek	Professeur	ENSA Alger
Examineur	Prof. BRIMA Abdelhafid	Professeur	Université de Batna 2
Examineur	Prof. BERROUKCHE Abdelkrim	Professeur	Université de Saida
Examinatrice	Dr. FERHAT Radhia	M.C.A.	Université de Batna 1

Année Universitaire: 2020-2021

REMERCIEMENTS

Je remercie **ALLAH** tout puissant, maître des cieux et de la terre, qui m'a permis de mener à bien ce travail.

Cette thèse de doctorat 3^{ème} cycle (LMD) est réalisée sous la direction du **Pr. ZITOUNI Bariza** au sein du Laboratoire Sciences des Aliments (LSA), du département de technologie alimentaire, institut des sciences vétérinaires et des sciences agronomiques, université de Batna 1.

Tout d'abord, je tiens surtout à adresser mes plus vifs remerciements à ma promotrice **Pr. ZITOUNI Bariza**, professeur au Département de Technologie Alimentaire, Institut des sciences vétérinaires et des sciences agronomiques, université de Batna 1; d'avoir dirigé ce travail avec compétence. Tout au long de ce travail, elle m'a apporté un soutien constant, une disponibilité, une écoute, une confiance et des conseils précieux.

Ensuite, je tiens à adresser mes plus vifs remerciements à mon co-promoteur **Pr. AMIALI Malek**, professeur à l'école nationale supérieure agronomique, Alger, pour son aide, sa grande patience, pour sa disponibilité et ses conseils judicieux.

Je dois mes profondes reconnaissances et mes sincères remerciements au **Pr. FAHLOUL Djamel**, professeur en génie des procédés, directeur du laboratoire de recherche LSA au département de technologie alimentaire, institut des sciences vétérinaires et des sciences agronomiques, université de Batna1, qui est à l'origine de la proposition de ce thème de recherche. C'est un grand honneur pour nous d'avoir accepté de présider le jury. A cette occasion je tiens, tout particulièrement, à témoigner une vive reconnaissance à toutes les équipes du LSA, pour l'aide et la gentillesse.

Je remercie le **Pr. BRIMA Abdelhafid**, du département de mécanique, faculté de technologie, université de Batna 2, pour l'honneur qu'il nous fait en siégeant à ce jury. C'est un grand plaisir pour nous d'avoir accepté d'examiner cette thèse.

J'exprime ma gratitude au **Pr. BERROUKCHE Abdelkrim**, Professeur au département de biologie, faculté des sciences, université de Saida d'avoir accepté de juger à ce travail. C'est un grand plaisir pour nous d'avoir accepté de participer au jury.

Je remercie fortement **Dr. FERHAT Radhia**, maître de conférences au département de technologie alimentaire, institut des sciences vétérinaires et des sciences agronomiques, à l'université de Batna 1, et le chef de département de technologie alimentaire, université de Batna 1, d'avoir accepté d'examiner cette thèse.

Je dois mes profondes reconnaissances au **Pr. Raghavan Vijaya GS**, chef de département de génie des ressources biologiques, université de McGill, Canada; dont j'ai eu l'opportunité de d'apprendre de nouvelles techniques et un soutien de haut niveau. Je voudrais insister sur l'accueil chaleureux, la disponibilité et la gentillesse de l'ensemble des équipes du département que j'ai pu côtoyer tout au long de la durée du stage. J'ajouterai une mention spéciale à monsieur **LYEW Darwin** et Monsieur **Gariépy Yvan**, qui ont accepté de partager avec moi leurs idées, leur temps et leurs motivations sur ce projet de recherche.

J'adresse également mes remerciements au directeur et ses équipes du laboratoire d'amélioration des productions agricoles et protection des ressources en zones arides « **LAPAPEZA** » du département d'agronomie, université de Batna 1, qui a accepté de réaliser une partie de mon travail dans leur laboratoire.

J'adresse aussi mes remerciements au directeur et ses équipes du Centre de Recherche Scientifique et Technique en Analyses Physico-Chimiques (**CRAPC**), Bou-Ismaïl, Tipaza.

Je remercie également le chef de département de technologie alimentaire, Université de Batna 1.

Je remercie ainsi le chef de département de technologie alimentaire à l'école nationale supérieure agronomique, Alger, pour m'avoir accueilli pendant quatre ans afin de réalisation mes travaux de thèse.

J'ajouterai une mention spéciale au **Dr. Rekik Fouad** maître de conférences à l'université de Batna 1, et au **Pr. BENNOUNE Omar** pour leurs grandes disponibilités et leurs gentillesse, leurs soutiens performants aussi bien techniques que moral.

Finalement, je tiens à remercier mes très chers parents, mon mari, mes frères, mes sœurs et ma chère amie **BESMA** pour leur soutien morale et physique, ainsi tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont aidé dans ma thèse.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements

Liste des abréviations

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction 1

Partie I: Synthèse bibliographique

Chapitre 1: Généralités sur la grenade

1. Grenadier dans l'histoire	7
2. Botanique	7
3. Classification de la grenade	8
4. Description et culture du grenadier	8
4.1. Fruits de la grenade	9
4.2. Exigences du grenadier	10
4.3. Entreposage de la grenade	11
5. Anatomie de la grenade	11
6. Compositions biochimiques de la grenade	12
7. Valeur nutritive de la grenade	12
8. Variétés de la grenade.....	13
9. Aire de répartition géographique	15
10. Effets thérapeutiques de la grenade	16

Chapitre 2: Méthodes de prétraitement: champs électriques pulsés et ultrasons

1. Traitement par champs électriques pulsés	18
1.1. Principe.....	18
1.2. Effet des CEP sur les caractéristiques physiques des tissus végétaux	20
1.3. Détection de la perméabilisation cellulaire	20
1.4. Influence des paramètres du CEP sur la perméabilisation cellulaire	23
1.5. Applications de la technologie CEP dans la transformation alimentaire	25
2. Prétraitement par ultrason.....	27
2.1. Principe.....	27
2.2. Effets physique et chimique des ultrasons.....	28
2.3. Effets paramétriques du prétraitement aux ultrasons	29
2.4. Applications de la technologie des ultrasons dans la transformation alimentaire ...	29
2.4.1. Déshydratation convective assistée par ultrasons.....	29
2.4.2. Déshydratation osmotique assistée par ultrasons	30

Chapitre 3: Méthodes de conservation par: séchage, froid et déshydratation osmotique

1. Généralités sur la conservation.....	32
2. Méthodes de conservation	32
3. Conservation par séchage	32
3.1. Différents modes de transfert de la chaleur	33
3.1.1. Transfert de la chaleur par convection	33
3.1.2. Transfert de la chaleur par conduction	34
3.1.3. Transfert de la chaleur par rayonnement	34
3.2. Cinétique du séchage	34
3.3. Différents types des séchoirs	37
3.4. Principales approches de modélisation pour le séchage	40
3.5. Avantages et les inconvénients du séchage	42
3.6. Quelques méthodes de séchage appliquées sur de la grenade	42
4. Conservation par le froid	45
4.1. Réfrigération	45
4.2. Congélation.....	46
4.3. Surgélation.....	48
4.4. Quelques méthodes de conservation par le froid appliquées sur les arilles de la grenade.....	49
5. Déshydratation osmotique	51

Partie II : Partie Expérimentale

Chapitre 1: Valorisation d'une variété de la grenade de la wilaya de Batna (l'Algérie)

Résumé

1. Introduction.....	55
2. Matériaux et méthodes.....	56
2.2. Propriétés physiques	56
2.3. Propriétés chimiques et biochimiques.....	58
2.4. Analyses statistiques	59
3. Résultats et discussion	60
3.1. Paramètres morphologiques	60
3.2. Couleur des arilles et du jus	61
3.3. Solides solubles totaux TSS, pH, acidité titrable AT et indice de maturité.....	61
3.4. Activité antioxydante ACT, phénolique totale PT et les anthocynes.....	62
3.5. Contenu minéral	63
4. Conclusion.....	63

Chapitre 2: Conservation de la grenade par le froid:

Effets de la température et de la durée de réfrigération sur les propriétés physico-chimiques, la composition de certain composant bioactif des arilles de la grenade

Résumé

1. Introduction	66
2. Matériel et méthodes	67
2.1. Matériel végétal et préparation des échantillons.....	67
2.2. Conditions de traitement et de stockage	67
2.3. Acidité titrable et solides solubles totaux	68
2.4. Couleur des arilles et du jus	68
2.5. Teneur totale en anthocyanes monomères.....	68
2.6. Contenu phénolique total	68
2.7. Contenu antioxydant	69
2.8. Analyses statistiques	69
3. Résultats et discussion	69
3.1. Analyses chimiques	69
3.2. Analyse de la couleur	71
3.3. Analyse des composants bioactifs sélectionnés.....	72
4. Conclusion.....	75

Chapitre 3: Séchage des arilles de la grenade:

Étude comparative de deux techniques de séchage (infrarouge et convectif) des arilles de la grenade

Résumé

1. Introduction	77
2. Matériels et méthodes.....	79
2.1. Produit	79
2.2. Méthodes de séchage	79
2.3. Modélisation mathématique du séchage.....	80
2.4. Composition physicochimique des arilles séchés.....	82
2.5. Analyses statistiques.....	83
3. Résultats et discussion	83
3.1. Comportement au séchage des arilles de la grenade	83
3.2. Composition physicochimique des arilles de la grenade séchés	89
4. Conclusion.....	92

Chapitre 4: Effets d'un prétraitement par CEP sur la membrane des arilles

Résumé

1. Introduction	94
2. Matériel et méthodes	96
2.1. Produit	96
2.2. Prétraitement par champ électrique pulsé CEP	96
2.3. Estimation du degré de perméabilisation.....	97
2.4. Analyse des couleurs	97
2.5. Microscopie électronique à balayage de la surface de l'arille	98
2.6. Analyses statistiques.....	98
3. Résultats et discussion	98
3.1. Effet du traitement CEP sur la perméabilisation cellulaire	98
3.2. Images MEB	99
3.3. Changements de couleur pendant le prétraitement.....	102
4. Conclusion	103

Chapitre 5: Effets d'un prétraitement par CEP sur le séchage des arilles

I. Etude de l'effet d'un champ électrique pulsé sur le séchage convectif des arilles

Résumé

1. Introduction	105
2. Matériel et méthodes	107
2.1. Produit.....	107
2.2. Prétraitement par champ électrique pulsé CEP	107
2.3. Séchage convectif	108
2.4. Modélisation mathématique du processus de séchage	108
2.5. Qualité physico-chimique et biochimique des arilles séchés	110
2.6. Analyses statistiques	111
3. Résultats et discussion	111
3.1. Comportement au séchage des arilles de grenade	111
3.2. Qualité physico-chimique et biochimique des arilles séchés	117
3.2.1. Couleur	117
3.2.2. Texture.....	118
3.2.3. Phénoliques totaux	119
3.2.4. Capacité antioxydante	120
4. Conclusion.....	122

II. Effet du prétraitement par champ électrique pulsé sur le comportement des arilles de grenade pendant le séchage par micro-ondes assisté à l'air chaud

Résumé

1. Introduction	123
2. Matériel et méthodes	125
2.1. Produit.....	125
2.2. Prétraitement par champ électrique pulsé CEP	125
2.3. Méthodes de séchage	126
2.4. Modélisation mathématique du processus de séchage	127
2.5. Propriétés physique et chimique des arilles séchés	129
2.6. Analyses statistiques	130
3. Résultats et discussion	131
3.1. Comportement au séchage des arilles de grenade	131
3.2. Propriétés physiques et chimiques des arilles séchés	137
3.2.1. Couleur des arilles séchés.....	137
3.2.2. Texture.....	138
3.2.3. Phénoliques totaux	139
3.2.4. Activité antioxydante.....	140
4. Conclusion.....	141

Chapitre 6: Effets d'un prétraitement par ultrasons sur le séchage des arilles:

Impact du prétraitement aux ultrasons sur la cinétique et la qualité des arilles de la grenade pendant le séchage convectif et par microonde assisté à l'air chaud

Résumé

1. Introduction	144
2. Matériel et méthodes	145
2.1. Produit.....	145
2.2. Prétraitement par ultrasons.....	146
2.3. Méthodes de séchage	146
2.4. Modélisation mathématique du processus de séchage	148
2.5. Propriétés physique et chimique des arilles séchés	150
2.6. Analyses statistiques	151
3. Résultats et discussion	151
3.1. Comportement au séchage des arilles de grenade	151
3.2. Propriétés physique et chimique des arilles séchés	159
3.2.1. Analyse des couleurs	159
3.2.2. Images MEB	161
3.2.3. Analyse de texture	162
3.2.4. Phénoliques totaux.....	164
3.2.5. Capacité antioxydante	165
4. Conclusion.....	166
Conclusion générale	168
Références	172
Publications et communications.....	189

Annexes

Résumé

Liste des abréviations

Paramètres	Significations	Unités
A:	Absorbance	
AOAC:	Association de chimiste analytique	
cm:	Centimètre	
°C:	Degré Celsius	
CIE:	Commission internationale de l'éclairage	
CEP:	Champ électrique pulsé	(KV/cm)
D:	Diamètre	(mm)
D_{eff}:	Diffusivité efficace	(m ² /s)
Eq:	Equation	
f:	Fréquence	(Hz)
H:	Humidité	
h:	Coefficient de transfert de chaleur	(W/m ² °C)
HPH:	Haute pression hydrostatique	
i:	Intensité électrique	(A)
IAA:	Industrie agroalimentaire	
Kv:	Kilo volt	
L:	Rayon de l'échantillon	(m)
m:	Masse	(g)
MR:	Taux d'humidité	(kg d'eau/kg de MS).
mg:	Milligramme	
MS:	Matière sèche	(%)
MHz:	Mégahertz	
pH:	Potentiel d'hydrogène	
R:	Résistance	(Ω)
S:	Siemens	
s:	Seconde	
t:	Temps	(s)
T°:	Température	(°C)
US:	Ultrasons	
UV:	Ultraviolet	
δ:	Conductivité électrique	(Sm ⁻¹)
ΔE:	Différence totale de la couleur	
μs:	Microseconde	
σ:	Constante de Stefan-Boltzman	(w/m ² k ⁴)

Liste des tableaux

Tableau 1: Classification botanique de la grenade.....	8
Tableau 2: Principaux constituants de la grenade.....	13
Tableau 3: Valeur nutritionnelle de la grenade (pour 100 g de portion comestible)	14
Tableau 4: Paramètres de traitement et les propriétés du matériau traité.....	23
Tableau 5: Modèles de séchage empiriques.....	41
Tableau 6: Travaux de recherche effectués sur le séchage de la grenade durant la période de 2007 à 2020.	43
Tableau 7: Conservation par le froid de la grenade.	49
Tableau 8: Principales propriétés physiques des fruits et des arilles.....	60
Tableau 9: Paramètres de la couleur des arilles et du jus de la cultivars de la grenade	61
Tableau 10: Principaux paramètres physicochimiques	62
Tableau 11: Activité antioxydante, phénolique totale et les anthocyne.....	63
Tableau 12: Teneur en minéraux (mg /100g) dans les arilles de la grenade.....	63
Tableau 13: Modèles mathématiques utilisés pour décrire le taux d'humidité de la courbe de séchage en couche mince.....	81
Tableau 14: Qualité d'ajustement des modèles pour le séchage infrarouge aux différentes températures.....	86
Tableau 15: Qualité d'ajustement des modèles pour le séchage par convection aux différentes températures.....	86
Tableau 16: Effets du prétraitement CEP sur la couleur des arilles.....	102
Tableau 17: Modèles mathématiques utilisés pour décrire le taux d'humidité de la courbe de séchage en couche mince.....	109
Tableau 18: Qualité d'adaptation des modèles pour séchage à l'air chaud prétraité par CEP aux différentes températures.	114
Tableau 19: Modèles mathématiques utilisés pour décrire le taux d'humidité de la courbe de séchage en couche mince.....	128
Tableau 20: Qualité d'adaptation des modèles par séchage à l'air chaud assisté par micro-ondes aux différentes températures et différents traitements CEP	134
Tableau 21: Couleur et la dureté des arilles séchés.....	138
Tableau 22: Modèles mathématiques utilisés pour décrire le taux d'humidité de la courbe de séchage en couche mince.....	148
Tableau 23: Qualité d'adaptation des modèles pour séchage à l'air chaud prétraité par ultrason aux différentes températures.....	154
Tableau 24: Qualité d'adaptation des modèles pour séchage aux micro-ondes assistées à l'air chaud prétraité par ultrason aux différentes températures.....	156

Liste des figures

Figure 1: <i>Punica granatum</i> L: (A) port de la plante, (B) tige florifère, (C) développement de fruit, (D) Fruits mûrs, (E) les arilles et (F) les grains	9
Figure 2: Parties de fruit de la grenade.....	10
Figure 3: Anatomie de la grenade.	11
Figure 4: Diversification des variétés de la grenade selon la couleur des grains.....	15
Figure 5: Répartition géographique de la grenade en Afrique.	16
Figure 6: Dispositif d'un CEP	19
Figure 7: Types d'impulsions: a) impulsion carrée et b) impulsion exponentielle décroissante	19
Figure 8: Effets d'un champ électrique sur la cellule.....	19
Figure 9: Exemple d'un épiderme d'oignon après traitement par CEP, impulsions d'une durée de 100 μ s aux différentes intensités.....	21
Figure 10: Exemple des micrographies MEB des tissus de pomme de terre non traités (a) et prétraités par CEP (b).	22
Figure 11: Relaxation de la force pour un tissu de pomme traité par CEP à 70 V/cm pour des durées variables.	23
Figure 12: Schéma d'un système d'échographie, (a) à sonde et (b) à bain	28
Figure 13: Vitesse de séchage en fonction du temps.....	36
Figure 14: Appareil infrarouge: (1) radiateur IR, (2) porte-échantillon en aluminium, capteur de température (3), (4) affichage et (5) commande bar.....	40
Figure 15: Effet de la température sur la durée de conservation de certains aliments	46
Figure 16: Courbe de la congélation typique et paramètres de congélation évalués.....	47
Figure 17: Impact des taux de la congélation sur la structure cellulaire des matériaux alimentaires d'origine végétale	48
Figure 18: Principes de la déshydratation osmotique.....	51
Figure 19: Carte montrant la localisation du domaine expérimental à Ain Touta– Batna.	56
Figure 20: Matériel végétal étudié: a) l'arbre, b) le fruit, c) les arilles et d) le jus.....	56
Figure 21: Propriétés chimiques pendant 16 semaines du stockage à -1, 0, 3 et 6°C.	71
Figure 22: Changement de la couleur totale pendant les 4 mois de stockage aux différentes températures.....	72
Figure 23: Analyse des composants bioactifs des arilles de la grenade pendant 4 mois de stockage aux différentes températures: a) teneur en anthocyane, b) variation des concentrations totales en polyphénols et c) variation de la capacité antioxydante.....	74
Figure 24: Appareil de séchage par infrarouge	80
Figure 25: Séchage des arilles de la grenade aux différentes températures: a) par chauffage convectif et b) par chauffage infrarouge.....	84
Figure 26: Taux de séchage des arilles de grenade aux différentes températures: a) chauffage convectif et b) chauffage infrarouge.....	85
Figure 27: Diffusivité efficace en fonction de la température: a) le séchage par convection et b) séchage par infrarouge	88

Figure 28: Teneur totale en polyphénols des arilles de la grenade séchés par chauffage (IR) et par (CD).....	89
Figure 29: Variation des paramètres de couleur des arilles de la grenade séchés par (a) chauffage convectif, (b) chauffage infrarouge	90
Figure 30: Absorption d'eau par les arilles de grenade séchés aux différentes températures par: (a) séchage convectif et (b) séchage infrarouge	92
Figure 31: Installation CEP	97
Figure 32: Effet de CEP sur la perméabilisation des arilles de la grenade.....	99
Figure 33: Indice de désintégration en fonction du nombre d'impulsions et de l'intensité du champ électrique.....	99
Figure 34: Images microscopiques des arilles de grenade: a) non traités, b) décongelés, c) prétraités à 0,5Kv/cm, d) prétraités à 1Kv/cm et e) les arilles prétraités à 1,5Kv/cm.....	101
Figure 35: Schéma d'installation CEP	107
Figure 36: Influence de l'intensité du champ électrique et de la température sur la teneur en humidité des arilles de la grenade aux différentes températures: a) à 50, b) à 60 et c) à 70°C.	113
Figure 37: Diffusivité effective pendant le séchage en fonction de l'intensité du champ électrique : a) non traités, b) prétraités à 0,5KV/cm, c) prétraités à 1KV/cm, d) prétraité à 1.5KV/cm	116
Figure 38: Couleur des arilles séchés en fonction de la température et de l'intensité du champ électrique: a) à 50, b) à 60 et c) à 70°C	118
Figure 39: Texture des arilles séchés en fonction de la température et de l'intensité du champ électrique	119
Figure 40: Teneur en polyphénols totaux des arilles séchés aux différentes intensités et aux différentes températures	120
Figure 41: Activité antioxydante des arilles séchés aux différentes intensités et aux différentes températures.....	121
Figure 42: Schéma de l'installation CEP	126
Figure 43: Installation de séchage par micro-ondes assisté à l'air chaud.....	127
Figure 44: Influence de l'intensité du champ électrique et de la température sur la teneur en humidité des arilles de la grenade aux différentes températures	133
Figure 45: Diffusivité effective lors du séchage par micro-ondes en fonction de l'intensité du champ électrique: a) non traités, b) prétraités à 0,5KV/cm, c) prétraités à 1KV/cm et d) prétraité à 1.5KV/cm	136
Figure 46: Teneur totale en phénols des arilles séchés par micro-onde aux différentes températures et prétraités avec différentes intensités du CEP.....	140
Figure 47: Capacité antioxydante des arilles séchés par micro-onde aux différentes températures et prétraités avec différentes intensités du CEP.....	141
Figure 48: Installation de séchage par micro-ondes assisté à air chaud	147
Figure 49: Influence de l'ultrason et de la température sur la teneur en humidité des arilles lors du séchage à l'air chaud: a) à 50, b) à 60 et c) à 70°C	152
Figure 50: Influence de l'ultrason et de la température sur la teneur en humidité des arilles lors du séchage par microonde assisté à l'air chaud: a) à 50, b) à 60 et c) à 70°C.....	153
Figure 51: Diffusivité effective pendant le séchage convectif en fonction du temps de traitement : a) non traités, b) prétraités à 10min, c) à 20min et d) à 30min.	158

Figure 52: Diffusivité effective pendant le séchage aux micro-ondes en fonction du temps de traitement : a) non traités, b) prétraités à 10min, c) à 20min et d) à 30min	159
Figure 53: Couleur des arilles séchés par microonde assisté à l'air chaud et aux différents temps de traitement par ultrasons.....	160
Figure 54: Couleur des arilles séchés par convection et aux différents temps de traitement par ultrasons.....	161
Figure 55: Images microscopiques des arilles de grenade: a) non traités, b) congelés-décongelés, c) prétraité à 10min, d) prétraité à 20min et e) prétraité à 30min	162
Figure 56: Dureté des arilles de la grenade séchés par les deux méthodes et aux différentes températures et au différent temps de traitement ultrasons	163
Figure 57: Contenu des composés phénoliques totaux dans les arilles de la grenade séchés par les deux méthodes et aux différentes températures et aux différents temps de traitement ultrasons.....	164
Figure 58: Capacité antioxydante des arilles de la grenade séchés par les deux méthodes et aux différentes températures et aux différents temps de traitement ultrasons	165

Introduction

La grenade (*Punica granatum* L.) est une culture traditionnelle, cultivée dans le monde entier dans les régions subtropicales et tropicales. On pense qu'il est originaire d'Asie centrale, en particulier de l'Iran et des pays voisins, d'où il s'est propagé au reste du monde (**Teixeira da Silva et al., 2013**). En médecine traditionnelle, toutes ses parties, fruits, racines, écorce, pépins et feuille sont utilisés (**ACHOUICHE et AZOUZI, 2019; BAKHTAOUI, 2019**).

Aujourd'hui, les pays méditerranéens et asiatiques sont les principaux centres de culture commerciale de la grenade (**Verma et al., 2010**). Ces dernières années l'Algérie est l'un des principaux producteurs de la grenade des pays méditerranéens avec une production annuelle totale de 717,063 t à 790,374 t (**Meziane et al., 2016**). Les grenades cultivés dans l'Algérie sont importantes en fonction du poids des fruits et des écorces, du nombre d'arilles, du rendement en jus, de l'acidité, de la teneur en solides solubles totaux et de l'indice de maturité (**Meziane et al., 2016**).

Les fruits de la grenade sont également considérés comme des aliments fonctionnels en raison de leur teneur élevée en composés phénoliques, en vitamines et en minéraux. Des nombreux rapports ont montré la bioactivité de la grenade. Les grenades ont montré une activité antioxydante plus élevée que le thé vert (**BAKHTAOUI, 2019**). Des études ont montré que la grenade a plusieurs fonctionnalités thérapeutiques: antimutagène (**Cano-Lamadrid et al., 2016**), prévention du cancer et traitement du cancer (**Lansky et Newman, 2007**), antioxydant (**Kalaycioğlu et Erim, 2017**), les activités anti-inflammatoires, hétoprotectrices et neuroprotectrices (**Rahmani et al., 2017**) et d'autres effets favorables à la santé (**Viuda-Martos et al., 2010**).

Les fruits de la grenade est très sensible aux réactions biochimiques, enzymatiques et microbiennes qui réduisent sa durée de conservation. Ces fruits ont une courte durée de conservation lorsqu'ils sont stockés à la température ambiante (**Aghdam et al., 2020**).

Plusieurs traitements ont été proposés pour prolonger le stockage et la durée de conservation des fruits de la grenade tels que le stockage à froid (**Oleksii, 2017; Adiletta et al., 2019**).

Les grenades récoltées sont stockées dans des conditions contrôlées ou modifiées pour prolonger leur délai d'approvisionnement au cours de l'année. Pendant le stockage, selon le cultivar, la température recommandée pour les grenades varie de 0 à 10°C et la durée de conservation varie de 8 à 16 semaines (**Mphahlele et al., 2016**).

Le séchage des aliments est l'une des méthodes les plus anciennes et les plus importantes pour la conservation des aliments (**Liu et al., 2019; Wei et al., 2019; Hasan Masud et al., 2020**). Les objets biologiques bruts (aliments, légumes et fruits) ont une teneur élevée en humidité (≈90%). Par conséquent, ils nécessitent l'élimination de l'eau libre disponible dans les

plantes pour la croissance microbienne et différentes réactions de dégradation enzymatique et oxydative. En règle générale, les fruits secs peuvent contenir de 12 à 14% d'eau, tandis que les légumes contiennent moins de sucre et peuvent contenir de 4 à 8% d'eau (**Vorobiev et Lebovka, 2020**). Généralement, la technique de séchage par convection reste la méthode la plus utilisée pour réduire la teneur en eau des fruits et des légumes, car elle est rentable. Cependant, l'inconvénient de cette technologie est principalement la dégradation de la qualité (macromolécules, vitamines et couleur) en raison du temps de séchage plus long. Par conséquent, l'exploitation de technologies innovantes telles que le séchage par l'infrarouge et par micro-onde est particulièrement intéressante (**Dak, 2014; Mphahlele, 2016**).

Pour surmonter les inconvénients mentionnés du séchage, il peut être combiné avec des prétraitements modernes (**Ni et al., 2020**). La plupart des prétraitements, qui visent à améliorer la transformation des aliments, dépendent de la perturbation de la structure cellulaire native des aliments d'origine végétale ((**Wang et al., 2018; Wiktor et al., 2019**). Les techniques les plus prometteuses : les traitements aux champs électriques pulsés et aux ultrasons (**Wiktor et al., 2019**).

Le champ électrique pulsé (CEP) est une technique de traitement alimentaire non thermique basée sur l'électroporation des membranes cellulaires dans les tissus biologiques entraînant une augmentation de la perméabilité cellulaire (**Thamkaew et Gómez Galindo, 2020**). La technologie CEP est basée sur l'application d'impulsions électriques de haute tension dans un temps très court à un produit, placé entre deux électrodes (**Blahovec et al., 2017**). L'utilisation de la technologie CEP pour traiter des matériaux solides a montré un grand potentiel pour réduire l'énergie requise pour la transformation ultérieure des aliments (**Liu et al., 2019, Pashazadeh et al., 2020**).

Le prétraitement par ultrasons a attiré beaucoup d'attention au cours des dernières années en tant que processus de prétraitement non thermique pour un large éventail de matériaux alimentaires (**Niamnuy et al., 2014**). Le principe de fonctionnement des ondes ultrasonores est basé sur le phénomène de cavitation. Dans les milieux liquides, la cavitation est le phénomène prépondérant induit par les ultrasons. Les ondes acoustiques induisent une compression et une expansion des échantillons (effet éponge), créent des canaux microscopiques dans l'échantillon et entraînent ainsi une fuite de liquide intracellulaire vers l'environnement (**Başlar et al., 2016**).

D'où la présente étude qui se concentre sur l'étude des méthodes de conservation de la grenade et leurs effets sur la qualité. Nous avons réparti notre travail sur deux parties:

Une partie bibliographique comportant trois chapitres:

- **Chapitre 1. Généralités sur la grenade:** Ce chapitre est une synthèse bibliographique sur la grenade.
- **Chapitre 2. Les prétraitements:** Ce chapitre est consacré aux prétraitements actuellement utilisés dans la conservation des aliments (prétraitement par ultrason et par champs électriques pulsés (CEP)).
- **Chapitre 3:** Les méthodes de conservation des denrées alimentaires

Et une partie expérimentale:

- **Chapitre 1. Valorisation de la grenade:** Le premier chapitre traite la caractérisation pomologique, physico-chimique du fruit et des arilles d'une cultivar de la grenade de la région d'Ain touta wilaya de Batna, Algérie. Ensuite la quantification des polyphénols des jus ainsi que l'évaluation de l'activité antioxydante.
- **Chapitre 2. Conservation de la grenade par le froid:** Les fruits de la grenade, endémiques aux climats subtropicaux, ne peuvent pas simplement être stockés à basse température, en raison du risque de blessure par le froid. Ce chapitre est consacré sur l'étude des effets de la température de stockage au froid sur les propriétés physico-chimiques du fruit de la grenade.
- **Chapitre 3. Séchage des arilles de la grenade:** L'objectif principal de ce chapitre est de déterminer l'influence de deux méthodes de séchage différentes (séchage convectif et infrarouge) sur la composition biochimique, la couleur et la propriété de réhydratation des arilles séchés et de modéliser la cinétique de séchage.
- **Chapitre 4. Effets d'un prétraitement par CEP sur les arilles:** Ce chapitre est concentré sur un aperçu approfondi de l'impact du CEP sur la perméabilisation de la membrane cellulaire des arilles de la grenade.
- **Chapitre 5. Effets d'un prétraitement par CEP sur le séchage des arilles:** Le traitement par champ électrique pulsé (CEP) est une nouvelle méthode de prétraitement non thermique qui préserve les aliments avec une excellente qualité sensorielle, nutritionnelle et longue durée de vie. Dans cette étude, l'impact du prétraitement CEP sur la cinétique de séchage par convectif et par microonde assisté à l'air chaud et la qualité des arilles de grenade séchées a été évalué.

- **Chapitre 6. Effets de prétraitement ultrasons sur le séchage:** l'effet du prétraitement par ultrasons sur la cinétique de séchage par deux méthodes différentes (convectif et séchage par micro-onde assisté à l'air chaud) et la qualité des arilles de grenade séchés ont été évalués.

Enfin, on a terminé notre travail par une conclusion qui englobe l'essentiel des principaux résultats obtenus ainsi que quelques perspectives et par une liste des travaux publiés.

Partie I: Synthèse bibliographique

Chapitre 1:

Généralités sur la grenade

1. Grenadier dans l'histoire

La grenade est originaire de Perse et peut-être aussi de certaines zones environnantes. De plus, on pense que l'origine se trouve en Asie centrale, en particulier dans certaines parties de l'Iran, d'où elle s'est propagée au reste du monde (Teixeira da Silva et al., 2013). Plus tard, elle s'est diversifiée vers d'autres régions comme les pays méditerranéens, l'Inde, la Chine, le Pakistan et l'Afghanistan, éventuellement par le biais d'anciennes routes commerciales. C'est l'un des plus anciens fruits comestibles connus (Khadivi et al., 2020).

La grenade (*Punica granatum* L.) est une culture fruitière économiquement importante et l'une des plus consommées au monde. Il est bien accepté par les consommateurs du monde entier pour ses avantages potentiels pour la santé tels que les activités antioxydantes, anti-hypertension, anti-mutagènes et anti-inflammatoires et ses qualités spéciales telles que le goût délicieux, l'excellente saveur, les basses calories, la belle taille et couleur attrayante.

La partie fraîche comestible du fruit de la grenade « les arilles »; est principalement consommée directement, mais parfois utilisée après séparation des graines, pour la préparation de jus frais ou de boissons en conserve, ainsi que des gelées, des confitures et d'agents aromatisants et colorants. Ces avantages de la grenade en ont fait l'un des principaux produits d'exportation horticole dans le monde entier, comme le rapportent les statistiques de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) (Khodabakhshian et Abbaspour-Fard, 2020).

2. Botanique

La grenade (*Punica granatum* L.), vient du latin *Punicus* qui désigne l'arbuste et signifie de Carthage, *Puniceus* désigne le rouge pourpré, son nom spécifique *granatum* vient du latin *granatus* qui signifie rempli de grains (Ludwig et al., 2008).

Le grenadier (*Punica granatum* L.) appartient à l'ordre Myrtales et à la Famille des punicacées, qui ne comprend que le genre *Punica* L. Les deux meilleures espèces connues de ce genre sont:

***Punica granatum* L.:** l'arbre de grenade, cultivé pour ses fruits.

***Punica nana* L.:** le grenadier nain, à usage ornemental dont les fruits ne sont pas comestibles. Parfois, cette espèce est considérée comme une variété de *P. granatum*, appelée *P. granatum* var. *nana* L.

Le nom scientifique actuel de la grenade, *Punica granatum*, est dérivé du nom *Pomum* (pomme) *granatus* (granuleux) ou pomme ensemencée.

Selon **Levin, (2006)**; «la grenade a été introduite de la région méditerranéenne dans le reste de l'Asie, de l'Afrique du Nord, de l'Europe et dans la péninsule indienne où elle a été signalée pour la première fois en Indonésie au 15e siècle» (**Teixeira da Silva et al., 2013**).

3. Classification botanique de la grenade

Le grenadier (*Punica granatum* L.) a été décrit par Linné et introduit dans sa classification en 1753 (Tableau 01).

Tableau 1: Classification botanique de la grenade (**Reguieg, 2019**)

	Classification 2003
Embranchement	Angiospermes
Sous embranchement	Dicotylédones vraies
Classe	Rosidées
Ordere	Myrtales
Famille	Lythraceae
Genre	<i>Punica</i>
Espèce	<i>Punica granatum</i>

Cette classification a été révisée en 2003, donnant naissance à la classification phylogénétique APGII, qui comporte 457 familles réparties dans 45 ordres. Au sein de cette classification, la position du grenadier est représentée dans le tableau 01. Il convient donc de retenir que dans cette nouvelle classification, la famille des Punicacées n'existe plus. Le grenadier appartient alors à la famille des Lythracées, famille comportant 30 genres et 600 espèces (**REGUIEG, 2019**).

4. Description du grenadier

Les plants de la grenade sont des arbustes ou de petits arbres d'environ 5 à 10 m de haut, bien que certains soient nains (1 à 2 m). La tige est lisse avec une écorce gris foncé, des branches parfois épineuses. Les feuilles sont opposées ou sub-opposées, souvent serrées sur de courtes pousses latérales, court-pétiolées, simples, entières, exstipulées, de 2–8 cm de long, oblongues ou obovales, brillantes, vert vif, glabres et glandulaires. Les fleurs sont terminales ou axillaires (figure 1). La capacité de contrôler le rosetage, ou la compression de la tige, la présence d'entre-nœuds plus courts et de feuilles étroitement disposées avec un méristème subapical inactif permettrait de développer de nouveaux cultivars ornementaux avec de nouvelles formes de croissance, ou même des variétés de fruits avec une forme plus compacte. pour une cueillette des fruits plus facile (**Teixeira da Silva et al., 2013**).

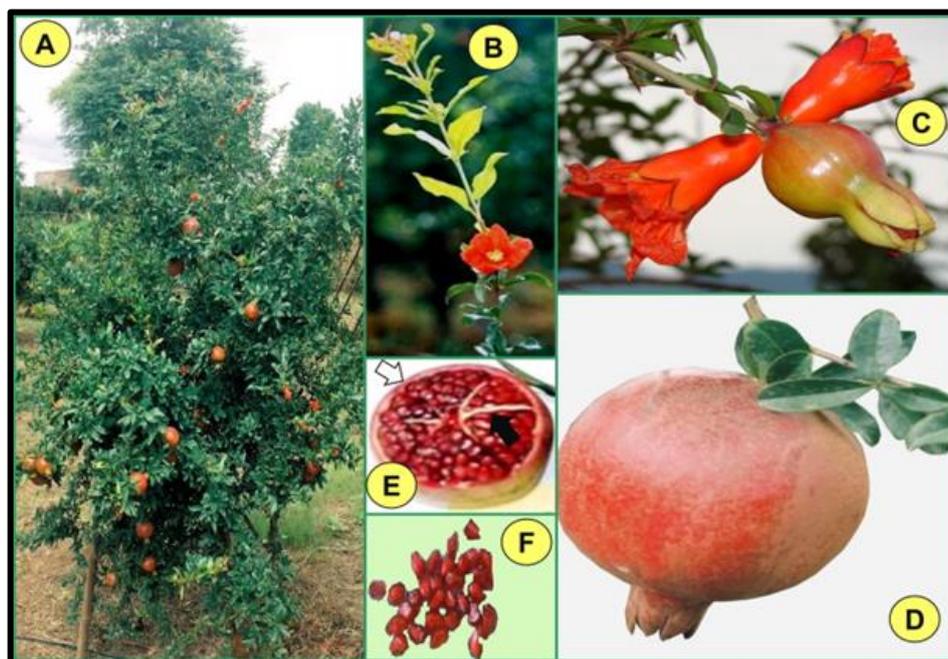


Figure 1: *Punica granatum* L: (A) port de la plante, (B) tige florifère, (C) développement de fruit, (D) Fruits mûrs, (E) les arilles et (F) les grains (Teixeira da Silva *et al.*, 2013).

4.1. Fruits de la grenade

Le fruit de la grenade est de forme sphérique ou globuleuse, à peau épaisse lisse, couronnée au sommet par les restes durcis du calice, de 7-12 cm de diamètre, jaunâtre à brun-rouge à maturité et souvent marbrée de taches aux couleurs plus vives. L'intérieur est divisé en loges finement cloisonnées contenant de nombreuses graines noyées dans une pulpe rougeâtre, acide ou plus ou moins sucrée (figure 2) (Arbonnier, 2002; Melgarejo *et al.*, 2020).

La grenade étant un fruit non climatérique, la maturité est un facteur important associé à son évaluation de la qualité. De nombreuses études ont démontré que plusieurs attributs physico-texturaux tels que la couleur de la peau, la fermeté de la chair, la taille, la forme et l'humidité ou le contenu solide et les attributs chimiques tels que les sucres, l'amidon ou la teneur en acide sont des critères appropriés pour juger la maturité des fruits (Khodabakhshian et Abbaspour-Fard, 2020).

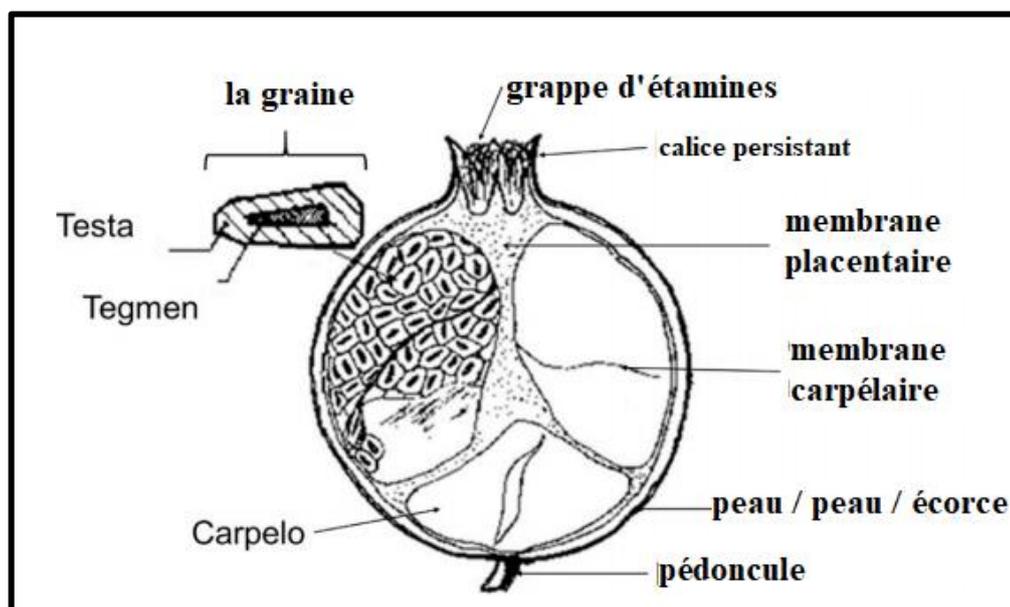


Figure 2: Parties de fruit de la grenade (Melgarejo et al., 2020).

4.2. Exigences du grenadier

Les grenadiers (*Punica granatum* L.) sont cultivés dans les régions subtropicales et tropicales du monde, notamment l'Iran, l'Inde, la Turquie, l'Afghanistan, l'Espagne, l'Égypte et d'autres parties de l'Afrique du Nord, la Chine, l'Italie, la France et les États-Unis et sont bien adaptés aux mauvaises conditions du sol et du climat.

Il a été signalé que la qualité et la quantité d'irrigation sont les deux principaux facteurs limitant l'expansion agricole dans les régions arides et semi-arides. Il a également été noté que la pénurie d'eau a entraîné une diminution de la croissance et de la qualité de nombreuses plantes (Peña - Estévez et al., 2015).

La dormance est une partie importante de la phase de développement des arbres fruitiers à feuilles caduques des zones tempérées, ce qui leur permet de tolérer et de survivre dans des conditions défavorables tout au long des saisons froides (Campoy et al., 2011). D'un autre côté, les températures froides en hiver sont essentielles pour la floraison et la production réussie de nombreux arbres fruitiers, et tous les arbres tempérés et subtropicaux ont des exigences de refroidissement pour promouvoir leur floraison, leur nouaison et leur production économiquement suffisante (Luedeling et al., 2009).

Il a été signalé que la production et la qualité des récoltes diminuent fortement lorsque l'hiver n'est pas suffisamment frais, et le non-respect de l'exigence de refroidissement peut entraîner une floraison irrégulière, un développement inégal des fruits, une réduction de la taille et du stade de maturité des fruits, réduisant ainsi la quantité et la qualité des produits (Luedeling et al., 2009).

Ces dernières années, en raison du réchauffement climatique, la température du monde a augmenté anormalement. Le changement climatique a affecté les taux de refroidissement et d'accumulation de chaleur, qui sont vitaux pour la floraison et la nouaison, et peuvent conduire à une réduction de la production d'arbres fruitiers (Ministère des statistiques agricoles du Jihad-Agriculture, 2017) tels que la grenade (Ghasemi Soloklui et al., 2017), la pomme (Nasrabadi et al., 2020) et l'amande (Ghasemi Soloklui et al., 2017).

4.3. Entreposage de la grenade

Traditionnellement, la grenade est séchée au soleil ouvert afin de la conserver. Mais le séchage au soleil a des inconvénients tels que la consommation du temps et la contamination par la poussière et les insectes (Kingsly et Singh, 2007).

Une grenade fraîche se conserve plusieurs semaines au réfrigérateur (Wald, 2009). La température d'entreposage recommandée pour les grenades variée entre 0 et 10°C avec une durée de vie allant de 8 à 16 semaines selon la variété (Nanda et al., 2001).

5. Anatomie de la grenade

Ce fruit se compose de deux parties, comestible et non comestible. La partie comestible contient des grains colorés juteuses, à l'intérieur de ces grains se trouve les pépins qui ressemblent au blé. La peau externe et la chaire blanchâtre qui entoure les grains représentent la partie non comestible (figure 3).

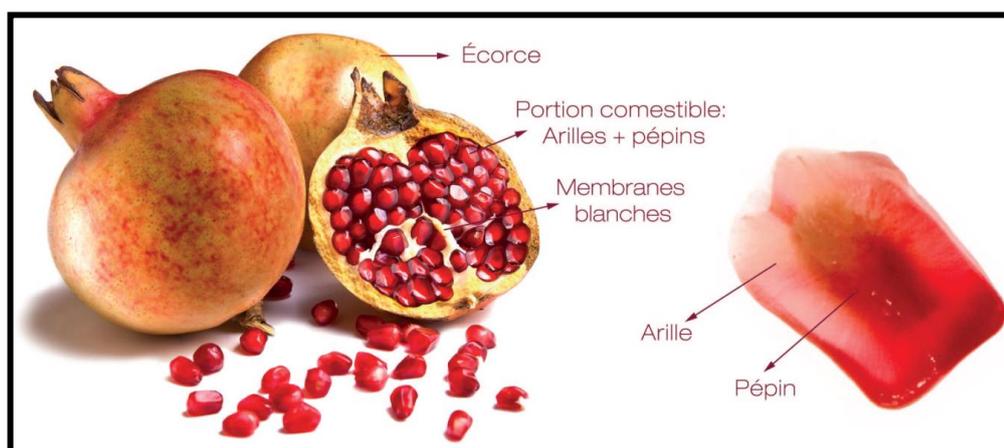


Figure 3: Anatomie de la grenade (Carbonell, 2011).

- ✓ **La partie non comestible du fruit:** (La peau ou l'écorce et la chaire blanchâtre) couvre 30 à 40% du poids total du fruit selon la variété, la situation géographique, les conditions de croissance, le stade de maturité, etc. À l'heure actuelle, les écorces de fruits sont considérées comme de nouvelles sources de composés bioactifs dans l'industrie de la

transformation des fruits qui sont devenues de plus en plus attrayantes en raison de leurs avantages économiques considérables. L'écorce est connue pour posséder des substances phytochimiques extraordinaires qui ont une signification médicinale et nutritionnelle. Ces composés peuvent être divisés en divers sous-groupes tels que les acides phénoliques, les flavonoïdes et les tanins (Singh *et al.*, 2018).

- ✓ **La partie comestible du fruit:** La portion comestible des fruits de grenade se compose de 29 à 54% d'arilles avec environ 80% de jus et 20% de graines. Le jus des arilles contient 85% d'eau, 10% de sucres totaux (glucose, saccharose et fructose), 1,5% de pectine, acides organiques (ascorbique, citrique, acide malique), acides gras (Acide linoléique conjugué et acide linoléique), amino acides (proline, valine et méthionine) (Putnik *et al.*, 2019).

6. Compositions biochimiques de la grenade

La grenade est une source importante de composés bioactives sanitaires tels que, les flavonoïdes, la quercétine, l'acide gallique, l'acide ellagique, les ellagitanins. La grenade contient également des anthocyanes comme la cyanidine, la delphanidine et la pélagonidine et d'autres tanins comme la punicaline, la pédonculagine et la punicalagine et des éléments minéraux (macro et micro-éléments), qui se situent dans différentes parties du fruit non comestibles et comestibles (la peau, la chaire interne blanchâtre, les grains, les pépins et le jus extrait de grains) (Morvaridzadeh *et al.*, 2020).

La composition biochimique de la grenade diffère selon la variété, la région, le climat, la maturité, les conditions de la culture et du stockage (Tableau 2).

7. Valeur nutritive de la grenade

La grenade est principalement consommée comme un aliment cru, à cause de ses propriétés nutritionnelles souhaitables. Elle est très sucrée, mais la présence d'acide citrique la rend également acidulée. Elle est aussi riche en vitamines B et C (Vidua-Martos *et al.*, 2011).

En effet, plusieurs études ont révélé que les parties de la grenade dont les arilles, les graines, l'écorce, les fleurs, l'écorce et les racines contiennent un large éventail de constituants bioactifs, notamment des polyphénols (comme les tanins, l'acide ellagique, les flavonoïdes, les anthocyanes), les acides gras, les stérols, les terpénoïdes et alcaloïdes (Amri *et al.*, 2017).

La grenade renferme également de nombreux oligo-éléments et minéraux, tels que le potassium, phosphore, calcium, magnésium, fer, zinc et cuivre. Les grains, sont très riches

en fibres insolubles, contenues dans le tégument de ces grains (Amri et al., 2017). Le tableau 3 résume la valeur nutritionnelle de la grenade.

Tableau 2: Principaux constituants de la grenade.

Parties de la plante	Constituants
Ecorce de la grenade	L'écorce du grenadier contiennent principalement des Alcaloïdes et les ellagitanins (Viuda-Martos et al., 2010).
Jus de la grenade	La teneur en polyphénols solubles varie de 0,2 à 1,0 g/100 g, étant les anthocyanes l'un des plus importants, ainsi que les tanins, dérivés de l'acide ellagique, et d'autres tanins hydrolysables qui contribuent à l'activité antioxydante du jus (Bonzanini et al., 2009).
Arilles de la grenade	Contiennent 85% d'eau, 10% de sucres totaux (généralement le fructose et le glucose), 1,5% de pectine, des acides organiques (tels que l'acide ascorbique et l'acide malique), et les composés bioactifs (principalement, les polyphénols, les flavonoïdes, et les anthocyanes) (Viuda-Martos et al., 2010).
Pépins de la grenade	Riche en matière grasse, l'huile extraite des pépins de la grenade représente un taux de 12% à 20% du poids total de ces pépins. Elle est caractérisée par une teneur élevée en acides gras polyinsaturés (n-3) tels que l'acide linoléique, linoléique, l'acide punique, l'acide oléique, l'acide stéarique, et l'acide palmitique. Les pépins contiennent aussi des protéines, des fibres brutes, des vitamines, des minéraux, du pectine, des sucres, des polyphénols (Viuda-Martos et al., 2010).

8. Variétés de la grenade

Dans le monde, les plus importants pays producteurs de la grenade sont les pays d'Orient dont l'Iran, la Turquie, la Transcaucasie et l'Inde mais aussi dans la zone méditerranéenne l'Algérie, la Tunisie, le Maroc, l'Espagne, l'Italie et la Grèce. Aux Etats-Unis et plus particulièrement en Californie, la culture de la grenade est très développée. La production de la grenade est en nette augmentation ces dernières années, montrant un regain d'intérêt pour ce fruit oublié depuis plusieurs décennies (Amri et al., 2017).

La grenade a été caractérisée par une grande diversité génétique de traits de qualité morphologiques et biochimiques. En fait, plus de 500 cultivars de la grenade ont été identifiés

dans le monde (figure 4) et il existe généralement deux types de grenade : les types comestibles et ornementaux. Le groupe comestible est divisé en fruits aigres, aigre-doux et sucrés selon le goût du jus ou les propriétés organoleptiques. Le groupe non comestible il diffère de la grenade comestible par sa taille plus courte, la couleur orange et rouge des fleurs et les petits fruits non comestibles (Amri et al., 2017). Ces derniers ne se différencient pas seulement par leurs aspects extérieurs couleur du fruit mais aussi par leur composition physicochimique, en particulier par leur teneur en sucres et en acides totaux, raison pour laquelle on propose souvent une répartition en grenades aigres, aigres-douces et douces (Fischer-Zorn et Ara, 2006).

Tableau 3: Valeur nutritionnelle de la grenade (pour 100 g de portion comestible) (FAO/OMS, 2009).

Composition	Unité	Quantité
Eau	g	80-82,3
Valeur énergétique	kcal	63-78
Protéines	g	0,5-0,95
Matières grasses	g	0,3-0,9
Glucides	g	16,4
Fibres	g	0,2-0,6
Cendres	g	0,5
Phosphore	mg	8,0-37
Fer	mg	0,3-2,1
Potassium	mg	259
Calcium	mg	3,0
Sodium	mg	3,0
Manganèse	mg	3,0
Zinc	mg	0,12
Magnésium	mg	0,15
Cuivre	mg	0,07
Sélénium	mg	0,6
Acide pantothénique (B5)	mg	0,596
Vitamine B1	mg	0,03
Vitamine B2	mg	0,03
Vitamine B3	mg	0,03
Vitamine C	mg	4-6



Figure 4: Diversification des variétés de la grenade selon la couleur des grains (Fernandes et al., 2015).

9. Aire de répartition géographique

Aire de distribution du grenadier comprend le Moyen-Orient, sa terre d'origine. S'étend jusqu'en Inde et Chine ainsi fait le tour de la méditerranéen (reguieg, 2019).

Ces dernières années, ce fruit a vu une grande expansion dans plusieurs pays, en particulier ceux avec un climat méditerranéen (Algérie, Maroc, Espagne, Turquie, Tunisie et Egypte), où les fruits d'excellente qualité peuvent être obtenus (figure 5).

En Algérie, la culture de la grenade a changé considérablement à la suite de l'aide à la récupération agricole Programme National de Développement Agricole (PNDA). La production est passée de 717,063 t à 790,374 t en 2012 et 2014, respectivement, tandis que le rendement a augmenté de 7,83 t ha⁻¹ à 8,42 t ha⁻¹. (Meziane et al., 2015).

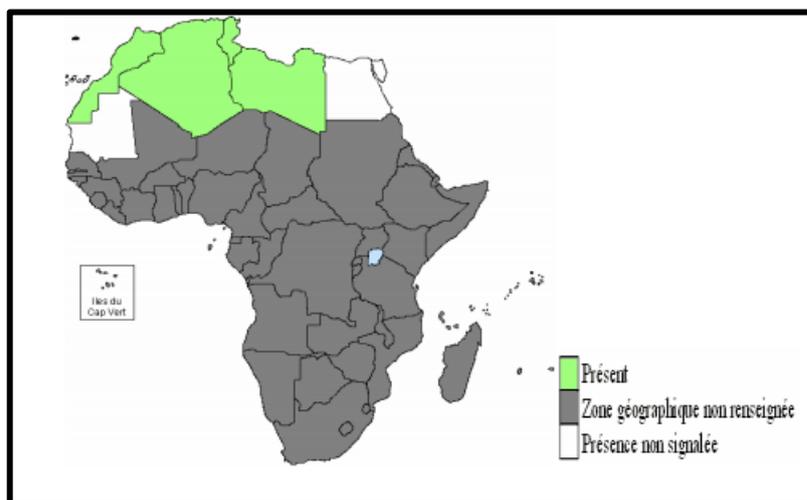


Figure 5: Répartition géographique de la grenade en Afrique (reguieg, 2019).

10. Effets thérapeutiques de la grenade

La production de la grenade est d'une grande importance, car chaque partie du fruit (par exemple, la peau, les arilles et les graines) est riche en composés bioactifs (CBA).

Les CBA offrent de nombreux avantages pour la santé adaptés à diverses applications pour l'alimentation, les produits pharmaceutiques, les cosmétiques (Caligiani, 2016), la médecine et les nanotechnologies et peuvent donc être considérés comme un super aliment, le grenadier est considéré comme « une pharmacie en soi ».

Des recherches approfondies au cours des dernières années ont révélé qu'un apport d'une alimentation riche en fruits et légumes est fortement lié à une réduction du risque de cancer car ils contiennent une abondance de composés phytochimiques dotés de puissantes propriétés anticancéreuses (Lorenzo Rodriguez et al., 2018).

Sur le plan pharmacologique, *Punica granatum* possède de nombreux composants actifs de nature antioxydante, anti-inflammatoire et neuroprotectrice (Lorenzo Rodriguez et al., 2018).

En outre, il a été démontré que la grenade présente des propriétés antibactériennes, anti-prolifératives, anti-invasives, anti-métastatiques et apoptotiques. L'huile de graines de la grenade et d'écorce de grenade contient de nombreux polyphénols et flavonoïdes qui possèdent des propriétés antioxydantes et cicatrisantes (Khwairakpam et al., 2018).

Chapitre 2:
Méthodes des prétraitements:
Champs électriques pulsés et
ultrasons

Le prétraitement est une étape importante avant le séchage des aliments, en particulier les fruits et les légumes. Plusieurs méthodes de prétraitement ont été largement utilisées ; elles vont des méthodes aussi simples que l'immersion dans des solutions chimiques, le blanchiment à l'eau chaude à des méthodes plus nouvelles telles que les prétraitements par ultrasons, par haute pression et par champs électriques pulsés (CEP) (Niamnuy, 2014;Llavata et al., 2020).

1. Traitement par champs électriques pulsés

Dans le passé, la technique CEP était utilisée pour inactiver les micro-organismes dans les aliments et les eaux usées (Pankiewicz et al., 2020). Les premières expériences avec les applications de CEP pour tuer les micro-organismes ont été signalées dans les années 1960. Plus tard, dans les années 1970 ; les expériences fondamentales en cas de rupture électrique des membranes biologiques ont été réalisées et le concept d'électroporation membranaire était théoriquement fondé (Sitzmann, 2017).

Le CEP est une nouvelle méthode de conservation non thermique qui a le potentiel de produire des aliments avec une excellente qualité sensorielle et nutritionnelle et la durée de vie (Sitzmann et al., 2016).

Le traitement par (CEP) est un traitement innovant qui permet de perméabiliser les membranes végétales sans affecter leur qualité, la faible consommation énergétique des traitements électriques augmente leur attractivité en agro-alimentaire pour améliorer les procédés de séchage, d'extraction et de la déshydratation (Andreou et al., 2020).

1.1. Principe

La génération de champs électriques pulsés se fait par le biais d'installations électriques composées essentiellement d'un générateur haute-tension et d'une cellule de traitement (figure 6).

Le générateur haute-tension permet la transformation du courant électrique alternatif en un courant discontinu sous forme d'impulsions dont l'amplitude est généralement comprise entre 400 et 5000 V et la durée comprise entre 10 et 1000 μ s. Deux types principaux d'impulsions peuvent être générés, selon l'installation. Il s'agit des impulsions exponentielles décroissantes et des impulsions carrées (figure 7) (Giteru et al., 2018).

L'unité de traitement comprend une chambre de traitement ; se compose de deux électrodes maintenues dans une position particulière par des isolants qui forment également une enceinte contenant des matières alimentaires. Les électrodes sont séparées par une distance (écart) (d) (cm), qui dépend du type de produit et de l'intensité du traitement requis. La forme et la taille

des électrodes peuvent être conçues pour s'adapter à des produits alimentaires spécifiques (solide/liquide) et au volume de traitement (Giteru *et al.*, 2018; López-Gámez *et al.*, 2020).

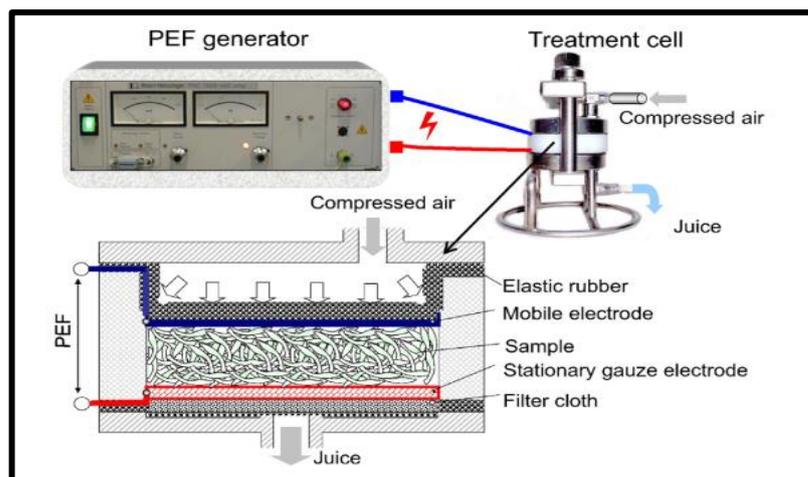


Figure 6: Dispositif d'un CEP (Barba *et al.*, 2015).

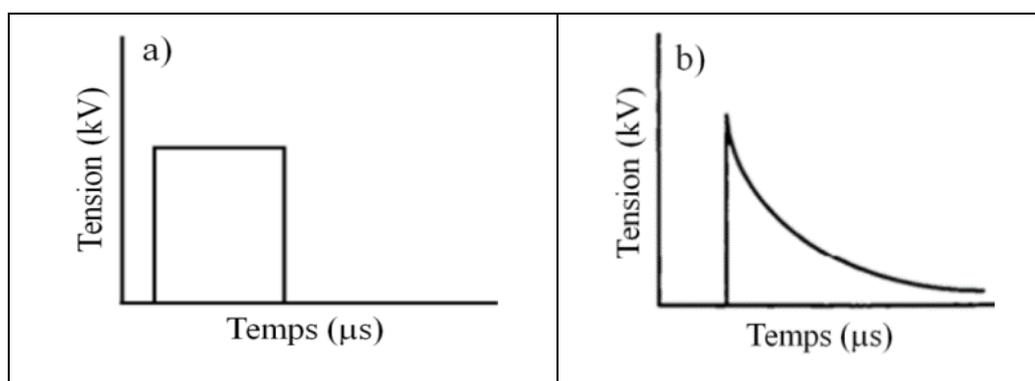


Figure 7: Types d'impulsions: a) impulsion carrée; b) impulsion exponentielle décroissante (Giteru *et al.*, 2018).

Dans la pratique, le produit alimentaire est placé entre deux électrodes, puis le champ électrique pulsé est appliqué. L'application du CEP induit une différence de potentiel transmembranaire à travers la membrane cellulaire. Un phénomène connu sous le nom d'électropermabilisation se produit lorsque ce potentiel atteint une valeur critique, ce qui entraîne une augmentation de la perméabilité des cellules et la rupture de la membrane de manière réversible ou irréversible en fonction de la magnitude de l'énergie appliquée (figure 8) (López-Gámez *et al.*, 2020).

En cours d'électroporation réversible, le CEP induit une perméabilité transitoire de la membrane. Il en résulte la formation de structures perméantes (souvent appelées «pores» ou «nanopores»), qui facilitent l'échange de nutriments avec l'environnement cellulaire. Lorsque l'élargissement des pores est irréversible, les cellules sont tuées et leur contenu est libéré (Vaessen *et al.*, 2018; Llavata, 2020).

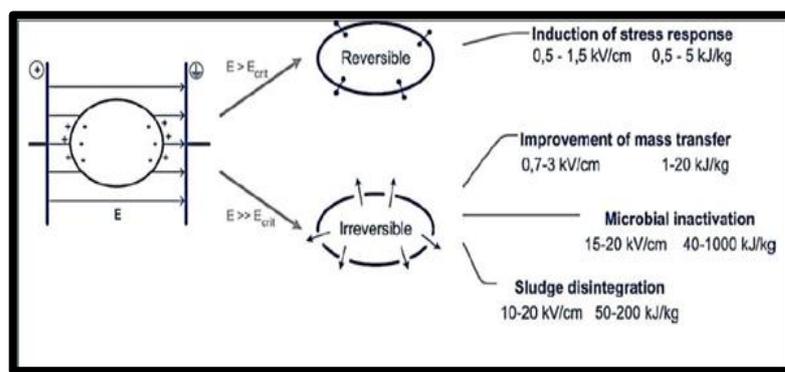


Figure 8: Effets d'un champ électrique sur la cellule (Vaessen et *al.*, 2018).

1.2. Effet des CEP sur les caractéristiques physiques des tissus végétaux

Les membranes des cellules végétales et microbiennes sont affectées de manière significative lorsqu'elles sont exposées au traitement CEP, en fonction de l'intensité du traitement.

Lorsque le potentiel global dépasse une valeur critique d'environ 1 V, en fonction de la compressibilité, la permittivité et de l'épaisseur initiale de la membrane, la force de compression électro provoque une rupture diélectrique locale de la membrane induire la formation des pores en qualité d'un canal conducteur (Soliva-Fortuny, 2009).

Une augmentation drastique de la perméabilité rétablit l'équilibre des différences de potentiel électrochimiques et électriques du plasma de la cellule et le milieu extracellulaire. Concepts alternatifs sont basés sur la réorientation moléculaire et des défauts localisés au sein de la membrane cellulaire qui sont élargis et déstabilisé par exposition à un champ électrique (Zhao, 2014).

Les études ont montré que le tissu végétal est perturbé sous traitement CEP à température ambiante en utilisant des intensités de champ électrique modéré (MEF) de 0,5 à 5,0 kV/cm pendant 10^{-4} à 10^{-2} s. Il y a une rupture complète des membranes microbiennes à une intensité de champ de 15 kV/cm (Barba, 2015; Wang, 2018).

1.3. Détection de la perméabilisation cellulaire

Différentes techniques ont récemment été développées pour estimer l'impact de CEP sur les tissus végétaux (Vorobiev et Lebovka, 2013).

1.3.1. Microscopie optique

La perméabilisation cellulaire peut être détectée par microscopie optique en utilisant plusieurs types des colorants, tels que le bleu de Trypan (BT), l'iodure de propidium (IP) et le rouge neutre (RN).

Les cellules sont considérées comme perméabilisées si leur cytoplasme est de couleur bleu dans le cas de BT ou fluorescent dans le cas de IP. C'est la conséquence d'un accès facilité au cytoplasme. Si les cellules ne sont pas perméabilisées, seuls la membrane cellulaire ou le noyau sont colorés (Fincan et Dejmek, 2002).

Fincan, (2003); a utilisé le RN pour étudier l'effet de l'intensité du CEP sur un tissu d'oignon (figure 9). Le RN change de coloration avec le pH; il est rouge dans un milieu acide, jaune dans un milieu basique et orange dans la zone du virage comprise entre pH 6,8 à pH 7.

Le RN a été appliquée sur des compartiments cellulaires avec un pH acide (vacuole par exemple). Les cellules sont traitées dans un milieu tampon de pH=7,8. Donc si les membranes sont perméabilisées, le tampon basique pénètre dans la cellule et se mélange avec le milieu intracellulaire. La coloration de la cellule vire alors au jaune.

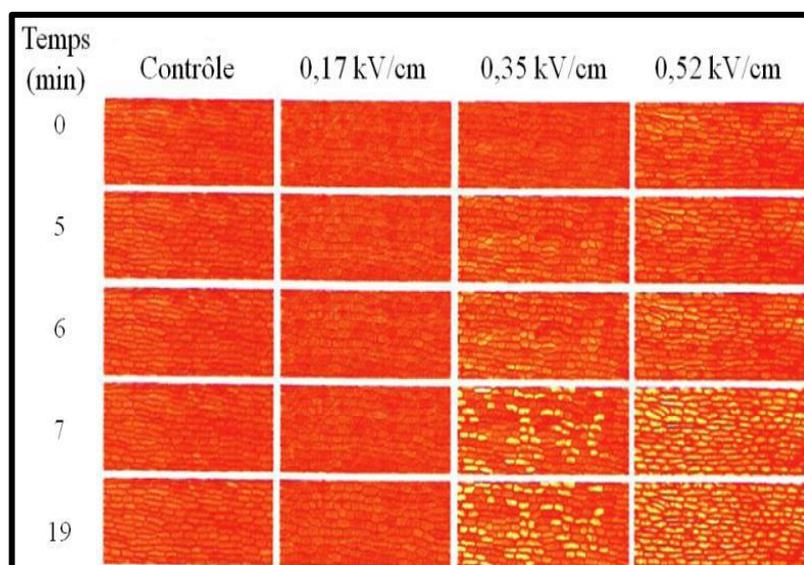


Figure 9: Exemple d'un épiderme d'oignon après traitement par CEP, impulsions d'une durée de 100 μ s, aux différentes intensités (Fincan et Dejmek, 2002).

1.3.2. Microscope électronique à balayage (MEB)

L'observation microscopique est le moyen le plus direct de déterminer le degré de dommage. Le MEB est une technique qui scanne la surface d'un matériau en utilisant un faisceau d'électrons concentré pour générer des microphotographies. Les signaux sont produits chaque fois qu'une interaction se produit entre les atomes et les électrons. Ces signaux consistent en des informations sur la composition du matériau et la topographie de surface (Sharma et al., 2020).

Il a été démontré que le CEP n'affecte pas sensiblement la structure des parois cellulaires. Cette importante conclusion a été confirmée par des images au microscope électronique à balayage (MEB), où une similitude dans la structure des parois cellulaires,

la superficie et la morphologie des granules d'amidon dans les tissus de pomme de terre non traités et traités au CEP a été observée (figure 10) (Vorobiev et Lebovka, 2013).

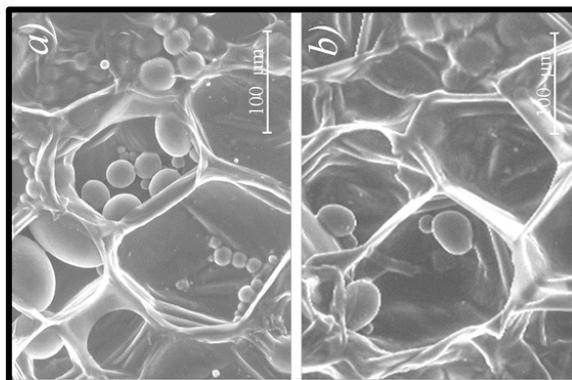


Figure 10: Exemple micrographies MEB de tissus de pomme de terre: (a) non traités et (b) prétraités par CEP (Vorobiev et Lebovka, 2013).

Cependant, l'application des méthodes microscopiques n'est pas simple en raison des difficultés liées à la préparation des échantillons et de la sensibilité de la méthode au pH et à la conductivité de la solution utilisée pour le montage de l'épiderme.

1.3.3. Mesure de la conductivité électrique

La mesure de la conductivité électrique des échantillons est un moyen largement utilisé pour évaluer la perméabilisation cellulaire. L'application d'un champ électrique pulsé provoque la diffusion du liquide intracellulaire vers le milieu extracellulaire. Le milieu intracellulaire présentant une conductivité supérieure à celle du tissu végétal intact. Une perméabilisation cellulaire provoquera donc l'augmentation de la conductivité électrique de l'échantillon. Il est ainsi possible de suivre l'électroperméabilisation des cellules au cours du traitement par CEP (Blahovec, 2017). Un indice de perméabilisation Z , a été défini comme suit par Rogov et Gorbato, (1974):

$$Z = \frac{\delta - \delta_i}{\delta_d - \delta_i} \quad (1)$$

Avec: δ la conductivité électrique ($S \cdot m^{-1}$); δ_i la conductivité électrique initiale ($S \cdot m^{-1}$); δ_d la conductivité électrique d'un échantillon complètement dénaturé ($S \cdot m^{-1}$). Ainsi défini, Z est compris entre 0 et 1: $Z = 0$ pour un tissu frais; $Z = 1$ pour un tissu complètement dénaturé, la référence du produit complètement dénaturé étant le produit congelé puis décongelé.

1.3.4. Mesures rhéologiques

Lors d'un traitement par CEP, les propriétés mécaniques des tissus végétaux sont affectées. Ces modifications peuvent être évaluées par des mesures rhéologiques (test de relaxation, test de compression). Après un traitement par CEP, le tissu perd de l'élasticité et l'échantillon bien perméabilisé a un comportement de relaxation proche de celui d'un produit congelé/décongelé. **Lebovka et al., (2005)**; ont utilisé le test de relaxation pour un tissu de pomme témoin (non traité par champ électrique), congelé-décongelé et traité par CEP à des durées de traitement différentes (figure11). Ils ont montré que l'augmentation du temps du traitement mène à une moindre résistance mécanique du tissu.

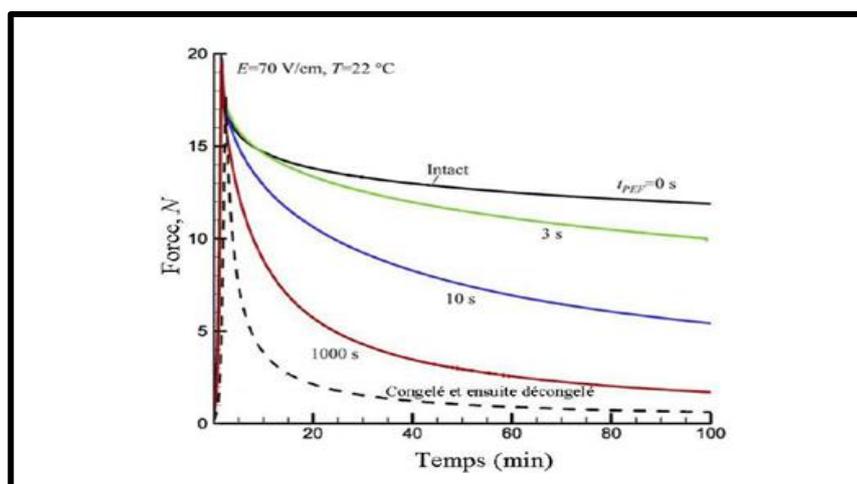


Figure 11: Relaxation de la force pour un tissu de pomme traité par CEP pour des durées variables (**Grimi, 2009**).

1.4. Influence des paramètres du champ électrique sur la perméabilisation cellulaire

Les facteurs affectant le potentiel transmembranaire créé par un champ électrique externe peuvent être divisés en plusieurs groupes. Intensité du champ électrique, la température, l'impulsion (forme d'onde d'impulsion, nombre d'impulsions), le du temps effectif d'exposition au CEP et paramètres cellulaires (taille des cellules, conductivités spécifiques de la membrane) (tableau 4) (**Vorobiev et Lebovka, 2013**).

Tableau 4: Paramètres de traitement et les propriétés du matériau traité (**Wiktor, 2016**).

Paramètres de traitement	Propriétés du matériau traité
Intensité du champ électrique	Conductivité électrique
Géométrie d'impulsion	pH
Nombre d'impulsions	Structure et porosité
Largeur d'impulsion	Taille de cellule
La fréquence	Forme des cellules
Température	Activité d'eau
Conception d'une chambre de traitement	Type de l'aliment

1.4.1. Influence de l'intensité du champ électrique

Comme décrit précédemment, selon la théorie de l'électrocompression, l'intensité du champ électrique doit atteindre une valeur critique pour perméabiliser la membrane cellulaire. Plusieurs études ont porté sur l'effet de l'intensité des CEP (**Bazhal et Vorobiev, 2000**). D'après **Lebovka et al., (2002)**; l'augmentation de l'intensité des CEP favorise l'électroporation des cellules. Toutefois, il existe une intensité optimale de perméabilisation du tissu végétal, située entre 200 et 1100 V/cm, qui engendrent une consommation énergétique minimale. Cette intensité optimale varie selon le tissu traité.

1.4.2. Influence de la durée totale du traitement

Semblable à l'intensité du champ électrique, le temps de traitement total est également un paramètre important du processus. Le traitement par CEP est constitué d'un certain nombre d'impulsions regroupées en «trains», eux-mêmes séparés par des temps de repos (dénommés « pauses inter-trains »). L'efficacité du traitement par CEP augmente si son application est prolongée jusqu'à un certain temps où la conductivité électrique du produit se stabilise, le produit est alors totalement électroporé (**Jin, 2020**).

1.4.3. Influence de l'échauffement du tissu

La température affecte considérablement l'efficacité du traitement électrique et la perméabilisation cellulaire. En effet, le traitement thermique a une influence sur la stabilité et la fluidité de la membrane cellulaire. Plusieurs études ont porté sur l'étude de la relation entre la température de l'échantillon pendant le traitement et l'efficacité du traitement par CEP. D'après **Shynkaryk, (2007)**; le couplage du traitement thermique avec le traitement électrique favoriserait l'extraction des composés végétaux. Il a été supposé que les phospholipides de la membrane sont les principaux responsables de cet effet. Cette même tendance a été observée par d'autres auteurs (**Evrendilek et Zhang, 2003; Heinz et al., 2003; Li et al., 2005**). Toutefois, si l'élévation de température est trop importante, un impact négatif sur la sélectivité de l'extraction a été observé. La température a aussi un effet sur les propriétés mécaniques du tissu. **Lebovka et al., (2004)**; ont montré qu'un préchauffage à 50°C contribue efficacement à l'endommagement des cellules.

1.4.4. Influence de la matière traitée

Les tissus végétaux ont des structures et des compositions très variables selon leur nature. En particulier, la teneur en eau peut varier beaucoup d'un tissu à un autre. Leur comportement vis-à-vis d'un traitement par CEP est alors très variable. **Bazhal et al., (2003)**; ont, après

expérimentation, proposé des valeurs optimales (qui engendrent une consommation énergétique minimale) pour l'intensité du champ électrique à appliquer pour différents fruits et légumes.

1.5. Applications de la technologie CEP dans la transformation alimentaire

Le traitement CEP, étant un processus non thermique, peut également avoir aucun effet néfaste significatif sur les composants présents dans les aliments thermolabiles tels que les vitamines.

1.5.1. Pressage de jus

Le pressage des fruits et légumes est un processus courant utilisé pour obtenir du jus. L'une des étapes clés qui a un impact sur le rendement du pressage est la phase de prétraitement appropriée. Des nombreux matériaux végétaux différents avant pressage sont broyés ou traités par des enzymes afin de faciliter le pressage du jus.

Par conséquent, l'application d'un champ électrique pulsé en raison du mécanisme d'électroporation peut être considérée comme une autre technique appropriée pour augmenter le rendement en jus. Jusqu'à présent, les recherches effectuées ont démontré que l'application du champ électrique pulsé peut faciliter le pressage du jus au moyen de l'électroporation qui conduit à la rupture de la structure cellulaire du tissu végétal. Ainsi, il peut être considéré comme une alternative non thermique et moins énergivore.

Par exemple, lorsqu'un tissu de pomme était traité par champ électrique pulsé, le rendement en jus augmentait de 32 à 45% par rapport au pressage de matériel intact (**Vorobiev et Lebovka, 2013**).

1.5.2. Congélation

La qualité des produits surgelés dépend de nombreux facteurs liés à la fois aux propriétés de la matière première et aux conditions de congélation. Parmi tous ces paramètres, le temps de la congélation, et en particulier le temps de transition de phase (c'est-à-dire le temps de congélation effectif), est considérée comme l'un des facteurs les plus importants qui façonnent la qualité des aliments surgelés.

Pendant la congélation, l'eau se transforme en cristaux de glace, dont la taille dépend du taux de congélation. La congélation lente contribue à la formation de gros cristaux de glace détruisant la structure interne du matériau après le processus de décongélation. Par conséquent, beaucoup d'efforts sont déployés afin de réduire le temps de congélation. Ce but peut être atteint soit par le changement de la technique de congélation, soit par l'application de l'étape de prétraitement. La littérature sur l'impact du CEP sur la cinétique de congélation ou les propriétés du matériau congelé-décongelé est limitée (**Vorobiev et Lebovka, 2013**).

Néanmoins, la littérature disponible montre que le prétraitement par champ électrique pulsé peut réduire le temps de la congélation. En raison de l'électroporation, la composition de la structure cellulaire interne devient plus homogène, même si la structure est plus désordonnée. Par exemple, l'air présent dans les espaces intercellulaires peut être remplacé par le contenu intracellulaire dû au phénomène de fuite provoqué par l'électroporation, ce qui modifiera les propriétés thermiques du matériau et améliorera en conséquence le transfert de chaleur entre le matériau et le milieu de congélation (**Vorobiev et Lebovka, 2013**).

1.5.3. Séchage et déshydratation osmotique

La déshydratation est l'une des plus anciennes techniques de conservation des aliments. La perforation induite électriquement de la membrane cellulaire et la perturbation de la paroi cellulaire peuvent améliorer la cinétique de la déshydratation osmotique et du séchage et modifier certaines propriétés des matériaux traités de cette manière (**Amami et al., 2006**).

Comme mentionné; le champ électrique pulsé améliore la cinétique de séchage et peut modifier les propriétés du matériau séché. Le traitement par champ électrique pulsé avant le séchage peut augmenter le coefficient de diffusion efficace de l'eau jusqu'à 16,8%, 25,8%, 33,3% et 39,7% par rapport au matériau intact dans le cas de la pomme, de la carotte, de la betterave rouge et de la pomme de terre, respectivement (**Witrowa-Rajchert et al., 2014**).

De plus, la consommation d'énergie de l'ensemble du processus de séchage assisté par CEP est plus faible par rapport au séchage de matériel intact (**Vorobiev et Lebovka, 2013; Chauhan et al., 2018**).

La déshydratation osmotique dépend d'un transfert de masse bidirectionnel: l'eau migre du matériau déshydraté vers la solution osmotique et la substance utilisée pour préparer la solution osmotique va à l'intérieur du matériau. L'application de CEP avant la déshydratation osmotique peut améliorer l'élimination de l'eau sans impact significatif sur le gain solide (**Amami et al., 2006; Wiktor et al., 2014**). L'effet positif du traitement CEP appliqué avant la déshydratation osmotique a été constaté pour les pommes, les carottes, les mangues ou les poivrons rouges (**Barba et al., 2015**).

2. Prétraitement par ultrasonique

Le prétraitement par ultrasons a attiré beaucoup d'attention au cours des dernières années en tant que processus de prétraitement non thermique pour un large éventail de matériaux alimentaires. Le traitement par ultrasons a été énormément utilisé pour les opérations de transformation des aliments dans la recherche en laboratoire ainsi que les industries (Niamnuy *et al.*, 2014).

Les principaux composants d'un système de traitement par ultrasons sont: le générateur, le transducteur et l'émetteur, comme le montre la figure 12a et b. Le générateur produit de l'énergie électrique qui est transformée en ondes sonores par un transducteur à des fréquences sélectionnées. Les transducteurs de type piézoélectrique convertissent le courant électrique en vibrations physiques tandis que le type magnétostrictif transforme le champ magnétique en vibrations physiques (Sharma *et al.*, 2020).

La gamme de fréquences des ultrasons varie de 20 kHz à 10 MHz dans les applications de transformation des aliments qui sont en outre classées en trois gammes:

- (1) Ultrasons basse fréquence/puissance (20–100 kHz): Dans cette gamme, des ondes d'amplitude énormes sont utilisées, ce qui provoque des variations des caractéristiques physico-chimiques et/ou des structures alimentaires.
- (2) Fréquence intermédiaire (100 kHz – 1 MHz): dans cette plage, des réactions chimiques sont déclenchées à l'intérieur des matériaux alimentaires en raison de la génération de radicaux libres.
- (3) Haute fréquence (1 à 10 MHz): dans cette plage, les ondes sonores ne modifient pas les structures des aliments et sont fréquemment utilisées pour les applications analytiques telles que la mesure des protéines, des graisses et de l'humidité dans les aliments, les variations d'uniformité de la pâte, la pureté de l'huile et composition, caractéristiques physiques des pâtes et adultération du miel (Sharma *et al.*, 2020).

2.1. Principe

Le principe de fonctionnement des ondes ultrasonores est basé sur le phénomène de cavitation. Dans les milieux liquides, la cavitation est le phénomène prépondérant induit par les ultrasons. Les ondes acoustiques induisent une compression et une expansion des échantillons (effet éponge), créent des canaux microscopiques dans l'échantillon et entraînent ainsi une fuite de liquide intracellulaire vers l'environnement (Başlar *et al.*, 2016).

Lorsque la puissance ultrasonore est suffisamment élevée, le cycle de raréfaction peut dépasser les forces attractives des molécules liquides et des bulles de cavitation se produisent

alors. Ces bulles atteignent progressivement une taille critique jusqu'à ce qu'elles deviennent instables et s'effondrent violemment. L'effondrement des bulles de cavitation induit des changements très élevés et rapides de la pression et de la température locales, conduisant à la décomposition des molécules d'eau en radicaux libres hautement réactifs, tels que H^+ et OH^- (Kumar et Sharma, 2017; Huang et al., 2020).

La puissance (W) et la fréquence (Hz) sont les principaux paramètres pour classifier les ultrasons. Selon l'échelle de fréquence, le domaine ultrasonore est divisé entre des ultrasons de basse fréquence, des ultrasons de haute et enfin des ultrasons de très haute fréquence. De plus selon l'échelle de la puissance, les ultrasons sont dits de faible puissance lorsqu'elle est inférieure à 1 W, dans ce cas les ultrasons n'induisent pas de modification du milieu qu'ils traversent, et lorsque la puissance ultrasonore est supérieure à 10 W, l'émission ultrasonore est susceptible de modifier le milieu traversé, on est alors dans le domaine des ultrasons de puissance (BELAFRIEKH, 2017).

Les ondes sonores fonctionnent de deux manières: le mode direct dans lequel une sonde crée les vibrations par contact direct avec l'échantillon et le mode indirect dans lequel un milieu secondaire tel qu'un bain d'eau crée les vibrations communiquées au échantillon indirect (figure 12) (Huang et al., 2020).

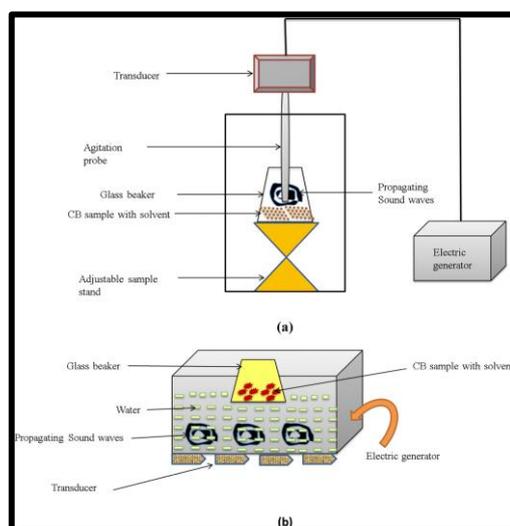


Figure 12: Schéma d'un système d'échographie: (a) à sonde et (b) à bain (Sharma et al., 2020).

2.2. Effets physique et chimique des ultrasons

Les effets physiques de l'échographie dominant à basse fréquence de 20-100 kHz avec un niveau plus élevé de cavitation transitoire (c'est-à-dire la force physique du son capable de déplacer des ions et de petites molécules en raison de gradient de pression) dominant aux fréquences supérieures à 1 MHz avec moins de contraintes physiques et chimiques. D'autre

part, les effets chimiques dominent aux fréquences > 200 kHz avec de plus grandes quantités de radicaux libres produites en raison de la génération d'un grand nombre de bulles actives par rapport à celles produites par la fréquence inférieure (Ashokkumar et al., 2010).

Particulièrement, l'ultrason à basse fréquence a été appliqué pour améliorer le transfert de masse et de chaleur, les taux de fermentation et les autres applications de traitement spécialisées (Awad et al., 2012; jha et al., 2017).

2.3. Effets paramétriques du prétraitement aux ultrasons

Les paramètres pendant le prétraitement par ultrasons, tels que la puissance ultrasonore, le temps de sonication, la fréquence et l'amplitude de la sonde du sonicateur, influenceront considérablement les caractéristiques et la qualité des matériaux alimentaires (BELAFRIEKH, 2017).

• Puissance

La puissance est le paramètre qui a l'effet le plus important. L'effet des ultrasons augmente avec la puissance fournie. Cependant, il existe une limite physique : lorsque la cavitation devient trop intense, un bouclier de bulles de cavitation se forme sur la surface émettrice (BELAFRIEKH, 2017).

• Fréquence

D'une manière générale, les auteurs ne sont pas tous d'accord sur l'effet de la fréquence. Une tendance est souvent admise que les basses fréquences favorisent les effets physiques et les hautes fréquences les effets chimiques des ultrasons (BELAFRIEKH, 2017).

• Température

La température également a une influence sur la cavitation. L'augmentation de la température diminue la solubilité des gaz dans les liquides, et augmente la tension de la pression de vapeur du solvant, donc le seuil de cavitation est abaissé ce qui facilite la création des bulles. Cependant il est prouvé qu'une augmentation de la température diminue l'efficacité des ultrasons (BELAFRIEKH, 2017).

2.4. Applications de la technologie des ultrasons dans la transformation alimentaire

2.4.1. Déshydratation convective assistée par ultrasons

Le séchage par convection est l'une des méthodes de conservation les plus utilisées et les plus anciennes dans l'industrie alimentaire en raison de sa facilité d'utilisation (Başlar et al., 2016).

Le processus de séchage par convection présente également plusieurs inconvénients, tels qu'une consommation d'énergie élevée, un faible taux de déshydratation, une faible qualité du produit, une température de séchage élevée et un temps de séchage long. Le taux de transfert d'humidité lent est l'un des principaux facteurs qui conduisent aux longs temps de séchage, ce qui réduit la qualité du produit et augmente la consommation d'énergie (**Başlar et al., 2016**).

La technologie des ultrasons, utilisée en conjonction avec le séchage par convection, peut offrir des avantages supplémentaires, tels que la réduction du temps de séchage, de la consommation d'énergie et la conservation des pigments colorés (caroténoïdes, anthocyane) et des composés bioactifs (polyphénols et vitamines) dans les produits séchés (**Başlar et al., 2016**).

L'échographie génère une série de compressions et d'expansions rapides dans le matériau; c'est ce qu'on appelle «l'effet éponge» et facilite l'écoulement du liquide hors des aliments en créant des microcanaux adaptés au mouvement des fluides. Le séchage par convection assisté par les ultrasons utilise une fréquence comprise entre 20 kHz et 40 kHz (**Başlar et al., 2016**).

2.4.2. Déshydratation osmotique assistée par ultrasons

Le processus de la déshydratation osmotique est basé sur l'immersion de l'aliment dans une solution hypertonique (osmotique). Le saccharose et le chlorure de sodium (NaCl) sont les agents osmotiques les plus couramment utilisés (**Başlar et al., 2016**).

La déshydratation osmotique assistée par ultrasons est un processus de déshydratation dans lequel une solution osmotique est exposée aux ondes ultrasonores. L'échographie dans ce cas est utilisée pour améliorer le transport de masse pendant la déshydratation osmotique. Lors de l'application d'ultrasons de puissance à basse fréquence, les ondes ultrasonores induisent un effet de cavitation. La cavitation provoque une série rapide de contractions et d'expansions dans le tissu alimentaire, ce qui est généralement appelé un effet éponge, car il est similaire à lorsqu'une éponge est pressée et libérée à plusieurs reprises. Les bulles formées par cavitation sont postulées pour créer des canaux microscopiques ou des capillaires dans le tissu pendant l'application des ultrasons. Cela conduit à l'élimination de l'eau et améliore les flux de soluté osmotique vers l'intercellulaire de la nourriture déshydratée (**Başlar et al., 2016**).

Chapitre 3:
Méthodes de conservation par:
séchage, le froid et par
déshydratation osmotique

1. Généralités sur la conservation

La principale composante des fruits et légumes est l'eau, avec une teneur allant jusqu'à 80 à 90%. Cette haute teneur en eau favorise l'activité microbienne et les réactions enzymatiques au sein des cellules, entraînant une dégradation chimique et une perte de qualité (**Alabi et al., 2020**).

De nos jours, il est bien connu qu'il faut diminuer la disponibilité de l'eau dans les aliments pour empêcher la prolifération microbienne et pour permettre leur conservation. L'adjonction de sel ou de sucre, le séchage sont des procédés de conservation qui sont basés sur ce principe, mais il est bien évident que nos ancêtres ignoraient les bases scientifiques de ces méthodes qu'ils utilisaient de manière totalement empirique (**Zambrano et al., 2019; BELAIDI et DOKARI, 2018**).

2. Méthodes de conservation

Les fruits et légumes fournissent aux gens une variété des vitamines essentielles, des antioxydants et des fibres alimentaires, qui sont bénéfiques pour des nombreux aspects de la santé (**Duan et al., 2020**).

Les pertes et les déchets après récolte dans la chaîne d'approvisionnement des fruits et légumes atteignent de 13 à 38% avant même que le produit atteigne le consommateur. L'industrie est confrontée au défi de minimiser les pertes après récolte. Par conséquent, des efforts de recherche sont nécessaires pour prolonger la durée de conservation des fruits et des légumes et par conséquent, réduire les pertes après récolte (**Duan et al., 2020**).

Les différentes méthodes de conservation ont pour but d'allonger la durée de vie des aliments, notamment en contrecarrant le développement des micro-organismes pathogènes. Ils sont présentés généralement en deux techniques soit par déshydratation soit par froid (**BELAIDI et DOKARI, 2018**).

3. Conservation par séchage

Les technologies de séchage sont des opérations unitaires très importantes pour réduire la teneur en eau avec une grande application dans le secteur de la fabrication alimentaire (**Musiak et al., 2016**). Il permet de convertir des denrées périssables aux produits stables, par l'abaissement de l'activité de l'eau (a_w) jusqu'à une valeur inférieure à 0,5. Les produits finaux se présentent généralement sous forme de poudre, des granulés, des feuilles ou des particules de différentes formes selon les exigences du fabricant et le type des technologies de séchage utilisées tout au long du processus (**Li et al., 2020**).

La plupart du temps, ces produits sont stockés à la température ordinaire, avant d'être réhydratés pour une utilisation dans un procédé industriel ou dans une préparation culinaire (**Menon et al., 2020; BENRABAH, 2019**).

Selon **DJERROUD, (2010)**; l'utilisation du séchage dans les IAA a des multiples buts:

- accroître la durée de conservation des produits alimentaires.
- transformer les produits par des réactions biochimiques (produits de salaison).
- produire des ingrédients ou des additifs pour une seconde transformation, également appelés produits alimentaires intermédiaires.
- Le séchage permet de réduire considérablement la masse et le volume des produits, ce qui facilite leurs transports et stockage.

3.1. Différents modes de transfert de la chaleur

Le séchage est une opération complexe qui met en jeu des transferts couplés de matière (d'eau essentiellement) et de la chaleur, accompagnés des modifications physico-chimiques et de structure du matériau (**AGGUINI et ZAIDI, 2017**).

3.1.1. Transfert de la chaleur par convection

C'est le mode de séchage le plus fréquent dans l'industrie ; plus de 85% des séchoirs industriels sont convectifs, avec de l'air chaud comme média pour le transfert de chaleur ; entraînant souvent des niveaux importants des changements dans la qualité du produit par rapport à la forme initiale «fraîche». Le risque de la détérioration du produit est donc important pour un produit thermosensible, dans la plupart des cas ; les méthodes de séchage conventionnelles produisent des produits de qualité inférieure et nécessitent des temps de séchage plus élevés (**Raghavi et al., 2018**).

Les séchoirs à armoire et à lit tels que four, plateau, convoyeur à flux rotatif et tunnel utilisant de l'air chaud comme moyen de transfert de chaleur appartiennent à la première génération et conviennent mieux aux matériaux solides (**Raghavi et al., 2018**).

Que ce soit par convection naturelle ou convection forcée, le taux de transfert de chaleur est donné par l'équation suivante (**Bazient et Castaigne, 2011**):

$$Q = h A (T_s - T_1) \quad (2)$$

Où:

h: Coefficient de transfert de chaleur par convection (en $W/m^2 \cdot ^\circ C$).

A: Surface ou aire considérée(en m^2).

T₁: Température du milieu chauffant ou refroidissant (en $^\circ C$).

T_s : Température à la surface du corps ou à la paroi (en °C).

3.1.2. Transfert de la chaleur par conduction

Le produit à sécher se trouve en contact avec une paroi solide portée à une température élevée par chauffage (fumées, vapeurs d'eau). La conduction à travers la paroi et la matière entraîne une augmentation de la température du produit à sécher: le liquide se vaporise donc par évaporation ou par ébullition s'il atteint sa température d'ébullition (**Degla et sioued, 2015**). Selon **Bazient et Castaigne, (2011)**; le taux de transfert de chaleur par conduction, s'exprime par la loi de Fourier:

$$Q = -K A \frac{T_0 - T_1}{X_0 - X_1} \quad (3)$$

Où:

K: Conductivité thermique (en w/m°C).

A: Surface ou aire considérée (en m²).

$T_0 - T_1$: Variation de température (en °C).

$X_0 - X_1$: Distance de transfert ou épaisseur(en m).

3.1.3. Transfert de la chaleur par rayonnement

L'apport d'énergie s'effectue par ondes électromagnétiques générées soit par des dispositifs électroniques (micro-ondes) soit par élévation de la température d'un émetteur infrarouge (**Boussalia, 2010**).

Le champ électromagnétique véhiculé par ces fréquences excite les molécules d'eau ; l'agitation moléculaire qui en résulte provoque des chocs intermoléculaires. Cela entraîne un échauffement du produit et donc la vaporisation des molécules d'eau (**Boussalia, 2010**).

La puissance thermique émise est donnée par la relation de Stefan-Boltzmann (**Bazient et Castaigne, 2011**):

$$Q = \epsilon A T_A^4 \quad (4)$$

Où:

ϵ : Constante de Stefan-Boltzman= 5.669×10^{-8} (en w/m²k⁴).

A: Surface ou aire considérée (m²).

T_A : Température absolue (K, 273+T °C).

3.2. Cinétique du séchage

Les très grandes variabilités et diversités des produits alimentaires et biologiques laissent envisager que le meilleur moyen de caractériser le comportement d'un produit alimentaire au

cours du séchage consiste à mesurer expérimentalement sa cinétique du séchage. Dans le cas d'un produit solide séché par entraînement, l'expérience de base consiste à placer le produit dans un courant d'air parfaitement maîtrisé (température, humidité, vitesse) et à enregistrer l'évolution de sa masse au cours du temps, par des pesées à intervalles de temps réguliers (**saidi, 2017**).

Deux types de courbes permettent de décrire l'évolution de la cinétique du séchage des produits:

1. La teneur en eau base sèche moyenne (X) du produit en fonction du temps (t); obtenue directement à partir de l'enregistrement de la masse au cours du temps, connaissant la teneur en eau initiale du produit.
2. La vitesse de séchage (dX/dt) en fonction de la teneur en eau base sèche (X).

Les courbes théoriques, obtenues pour des produits non hygroscopiques et peu déformables comme, par exemple, la cellulose, permettent classiquement de distinguer trois périodes:

- une période I de mise en température du produit, qui disparaît pratiquement lorsque le produit se présente sous forme de particules ou de feuilles, elle correspond à la montée en température du matériau humide, jusqu'à atteindre la température de bulbe humide caractéristique de l'environnement séchant. Cette période est généralement très courte.

- une période II de séchage à vitesse constante, qui correspond à l'évaporation superficielle de l'eau libre. Le produit reste en dehors du domaine hygroscopique, l'activité de l'eau dans le produit en surface reste proche de 1, et le séchage est contrôlé par les transferts externes. Pendant toute cette période, la température du produit est uniforme et égale (par définition) à la température du thermomètre humide de l'air, c'est-à-dire la température de l'air de séchage.

- une période III de séchage à vitesse décroissante où la surface du produit passe sous la limite supérieure du domaine hygroscopique, l'activité de l'eau (a_w) en surface du produit est inférieure à 1 et les transferts internes de matière deviennent limitant. La température du produit augmente à partir de sa surface. La teneur en eau base sèche du produit diminue jusqu'à atteindre une valeur limite (X_{lim}) qui dépend des conditions de l'air de séchage (température et humidité relative) (**Said, 2015**).

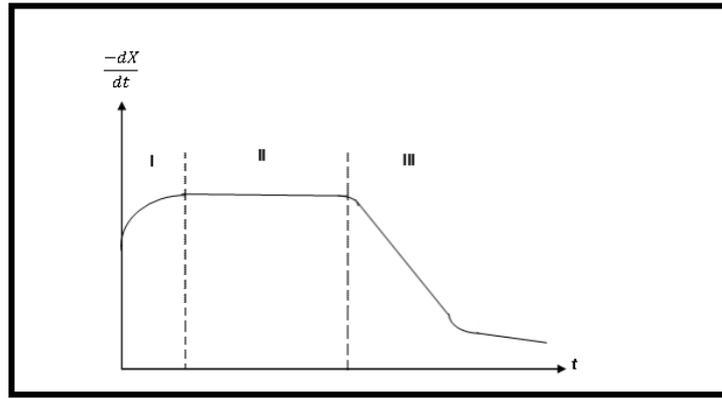


Figure 13: Vitesse de séchage en fonction du temps (Saidi, 2017).

L'étude expérimentale de la cinétique de séchage permet de caractériser le comportement d'un produit alimentaire donné au cours de sa déshydratation.

Les courbes types utilisées pour décrire l'évolution du produit au cours du séchage sont (Charreau et Cavaille, 2003):

- Le taux d'humidité du produit (MR) en fonction du temps (t), on obtient une courbe de séchage dont la forme la plus complète (c'est-à-dire lorsque toutes les phases de séchage existent).
- L'allure de séchage (dMR/dt) en fonction du temps (t).
- L'allure de séchage (dM/dt) en fonction du taux d'humidité (MR).

Le taux d'humidité (MR) a été calculé en utilisant l'équation (5):

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (5)$$

Où:

M_t : la teneur en humidité à tout moment (kg d'eau/kg de MS).

M_0 : la teneur en humidité initiale (kg d'eau/kg de MS).

M_e : l'équilibre d'humidité (kg d'eau/kg de MS).

La vitesse de séchage (DR) a été calculée en utilisant l'équation (6):

$$DR = \frac{M_t - M_{t+\Delta t}}{\Delta t} \quad (6)$$

Où:

$M_{t+\Delta t}$: la teneur en humidité à $t + \Delta t$ (kg d'eau/kg de MS).

t : est le temps en min.

La détermination de la diffusivité efficace en utilisant la deuxième loi de Fick de l'équation de diffusion (7), symbolisée par une équation de diffusion de masse pour le séchage des produits agricoles est représenté dans les équations suivantes (8) et (9):

$$\frac{\delta M}{\delta t} = D_{eff} \nabla^2 M \quad (7)$$

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp - \frac{\pi^2 D_{eff}}{L^2} t \quad (8)$$

$$\ln MR = \ln \frac{6}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff}}{L^2} t \quad (9)$$

Où:

MR: le taux d'humidité (kg d'eau / kg de MS).

D_{eff}: diffusivité efficace (m²/s).

L: rayon de l'échantillon (m).

t: temps (min).

3.3. Différents types des séchoirs

3.3.1. Séchoirs solaires

Le séchage au soleil est une méthode traditionnelle utilisée pour le séchage des produits agricoles et jusqu'à aujourd'hui, reste une technique de séchage largement utilisée.

Le séchage au soleil utilise l'énergie solaire pour la déshydratation des fruits et légumes principalement dans les régions subtropicales et tropicales. L'énergie rayonnante du soleil fournit de la chaleur pour évaporer l'humidité tandis que le vent disponible aide à déplacer l'humidité et accélère le processus de séchage (**Chua et al., 2019**).

Le séchage au soleil ouvert avait diverses limites comme les cultures sont affectées par les ravageurs, les oiseaux, la pluie, les tempêtes, la saleté, etc. De plus, la qualité n'est pas conforme aux normes internationales, de sorte que les agriculteurs n'obtenaient pas un bon rendement de leurs cultures. Le temps d'exposition est long et le séchage doit parfois être interrompu à cause des conditions climatiques défavorables (**Singh et Gaur, 2020**).

Il y a plusieurs types des séchoirs solaires développés pour sécher les produits agro-alimentaires. On peut classer les séchoirs selon la façon, dont ils utilisent le rayonnement solaire: Les séchoirs directs et les séchoirs indirect (un séchoir est dit direct : le produit est en contact directement avec les rayonnements solaire et le séchoir indirect lorsque les produits sont à l'abri du rayonnement) (**AGGUINI et ZAIDI, 2017; Singh et Gaur, 2020**).

3.3.2. Séchage à l'air par convection

Le séchage convectif est la méthode la plus couramment utilisée dans la déshydratation des aliments en raison du faible coût d'exploitation. Plus de 85% des séchoirs utilisés dans les industries sont de type convectif, utilisant des gaz de combustion ou de l'air chaud comme moyen de séchage. Cette méthode de séchage utilise l'exposition d'un produit à un flux continu d'air chauffé afin d'éliminer l'humidité. Le séchage convectif implique deux mécanismes de transport qui se produisent simultanément dans des directions opposées (**Chua et al., 2019**).

La chaleur est transférée de l'air du milieu de séchage à la matière alimentaire. Le film d'humidité à la surface du matériau est évaporé et éliminé par l'action du mouvement forcé de l'air. Dans le même temps, l'eau est transportée de l'intérieur du matériau vers la surface et emportée par un gaz vecteur ou un aspirateur (pour les séchoirs non convectifs), entraîné par un gradient de concentration d'humidité (**Chua et al., 2019**).

Le processus de transport de chaleur et de masse est affecté par la température, la vitesse de l'air, les gradients de concentration d'humidité et les propriétés du matériau. Cependant, avec le séchage convectif, il existe un problème inhérent au mouvement de l'eau liquide du cœur du produit vers la surface. Ce processus de diffusion est lent ; pour qu'une diffusivité d'humidité plus élevée se produise dans un gradient de température plus élevé entre les températures externes et internes est nécessaire. Soumettre des matériaux à une température élevée pendant le séchage à l'air convectif peut augmenter la vitesse de séchage, mais cela peut également entraîner la dégradation des constituants bioactifs sensibles à la chaleur (**Chua et al., 2019**).

3.3.3. Séchoir sous vide

Le séchage sous vide est une technique où les matières alimentaires sont séchées à basse pression tandis que le point d'ébullition de l'humidité à l'intérieur des matières alimentaires diminue et s'évapore aux basses températures. Le séchage sous vide est utilisé pour les produits alimentaires sensibles à la chaleur et sensibles aux changements de la couleur, d'apparence et de perte des nutriments. Ces dernières années, cette technologie a été largement utilisée pour le séchage des aliments contenant des composés hautement bioactifs en raison de sa capacité à empêcher l'oxydation (**Menon et al., 2020**).

3.3.4. Séchage par micro-ondes

Le séchage par microondes appartient au type de séchage par ébullition et obéit à un transfert de chaleur par rayonnement. Ce rayonnement, issu des ondes électromagnétiques, a une fréquence qui se situe entre celle de la lumière infrarouge. Sa longueur d'onde est comprise entre 1 mm et 1 m, et sa fréquence varie de 300 Mhz à 300 Ghz. Le mécanisme de séchage par

micro-ondes comprend la polarisation ionique et la rotation bipolaire. En fait, les molécules d'eau changent de direction, affectées par un champ électrique, interagissent avec les molécules environnantes et, par conséquent, l'énergie cinétique de l'eau est convertie en énergie thermique.

Comparé au mode de chauffage traditionnel, le chauffage par micro-ondes a des caractéristiques d'un chauffage sélectif, d'une vitesse de chauffage rapide, d'un chauffage uniforme et d'une efficacité thermique rapide (Du et al., 2020; Dehghannya et al., 2018).

3.3.5. Séchage par micro-ondes sous vide

Le séchage par micro-ondes sous vide est une technologie de séchage combiné qui intègre le chauffage par micro-ondes au séchage sous vide. Cette méthode de séchage combiné vise à maintenir ou accélérer le séchage par micro - ondes, tout en évitant tous les températures élevées (Cui et al., 2005; Chua et Chou, 2014).

Habituellement, un vide est appliqué pour diminuer la pression absolue à environ 7 kPa, ce qui correspond à une réduction du point d'ébullition de l'eau à 39°C (Wray et Ramaswamy, 2015). Cette propriété permet à l'eau contenue dans les produits de se vaporiser à des températures plus basses. À leur tour, les altérations chimiques défavorables des produits par les températures de séchage élevées sont réduites (Calín-Sánchez et al., 2013) et la qualité des produits en termes de la couleur, la saveur, la texture et la rétention des composés bioactifs et volatils de divers bioproduits est augmentée (Calín-Sánchez et al., 2011; Ji et al., 2012; Wray et Ramaswamy, 2015; Dong et al., 2018).

En plus d'avoir la capacité d'augmenter la vitesse de séchage et de réduire la durée totale du séchage. Le séchage par micro-ondes sous vide minimise les réactions d'oxydation en raison de l'absence d'air. Ce sont ces caractéristiques qui contribuent à un produit séché avec des concentrations plus élevées de composés bioactifs par rapport aux autres méthodes de séchage (Wray et Ramaswamy 2015; Figiel et Michalska, 2017).

3.3.6. Séchage par infrarouge

Le rayonnement infrarouge fait partie du spectre électromagnétique, variant entre 0,75 et 1 000 μm de longueur d'onde. Le séchage par infrarouge a été appliqué à la déshydratation des fruits, des légumes et des grains. En tant que technique de transformation des aliments, elle offre plusieurs avantages, notamment une capacité de transfert de chaleur élevée, un meilleur contrôle du processus et un chauffage uniforme et améliore donc la qualité des produits séchés (Moses et al., 2014).

Le séchage infrarouge a été étudié comme méthode potentielle pour obtenir des produits alimentaires à haute qualité (Hassan, 2006). Le rayonnement infrarouge fournit de l'énergie

directement à la surface de l'échantillon et provoque ainsi son échauffement rapide. La chaleur est transférée plus loin vers l'intérieur du matériau par conduction. Par conséquent, le séchage infrarouge lointain a quelques avantages sur le séchage à air chaud par convection, y compris une grande efficacité thermique de transfert, à la fois la surface et les couches intérieures sont chauffées intensément, ce qui entraîne un taux élevé de transfert de chaleur et de masse par rapport à séchage classique (Ninget *al.*, 2015).

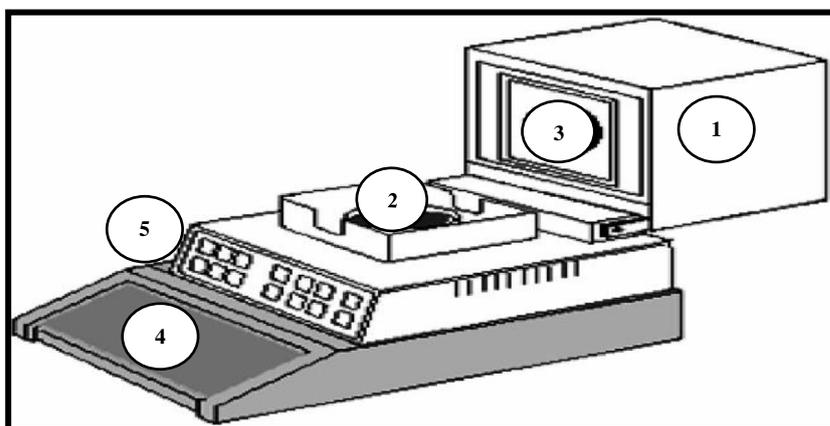


Figure 14: Appareil infrarouge : (1) radiateur IR, (2) porte-échantillon en aluminium, capteur de température (3), (4) affichage, (5) commande bar (Hassan, 2006).

3.3.7. Séchage par lyophilisation

La lyophilisation des matières biologiques est l'une des meilleures méthodes d'élimination de l'eau qui aboutissent au produit final de la plus haute qualité. (Sagar et Suresh, 2010).

Le séchage est réalisé en évitant de passer par l'état liquide, par sublimation, c'est-à-dire par passage direct de l'état de glace à l'état de vapeur d'eau. Ceci est réalisé sous vide avec une température du produit normalement inférieure à -10°C . Le but de la lyophilisation est d'obtenir un produit possède les mêmes caractéristiques que le produit d'origine. De même, la plupart des composants ne subiront aucune modification qualitative ou quantitative (AGGUINI et ZAIDI, 2017).

3.4. Principales approches de la modélisation pour le séchage

Généralement, les processus de séchage peuvent être modélisés en utilisant deux approches différentes: (i) une modélisation basée sur les principes de la physique et des mathématiques, et (ii) une modélisation basée sur une approche empirique.

Le premier type de modélisation nécessite des informations sur le matériau à sécher et les milieux de séchage, telles que ses propriétés thermo-physiques et les interactions complexes entre les deux, ce qui est très difficile à quantifier. Cette difficulté limite généralement la pertinence de tels modèles. Par conséquent, dans la plupart des études, les chercheurs

s'appuient sur des modèles empiriques ou semi-empiriques car ils donnent souvent la relation directe entre la teneur moyenne en humidité et le temps de séchage (**Ertekin et Firat, 2017; Yi et al., 2016**).

Les modèles de séchage empiriques, ou les modèles de séchage basés sur l'expérience, sont relativement plus faciles à calculer et sont plus simples à interpréter mathématiquement et par conséquent ; méritent d'être mentionnés (**Ramachandran et al., 2018**).

Ces modèles désuets forment la base de presque tous les modèles de séchage actuellement existants. Le développement d'un modèle empirique simple nécessite une expérience. L'ensemble des données expérimentales est ensuite utilisé pour dériver une relation mathématique entre les variables et le temps de séchage ou la teneur en humidité du matériau. Ces modèles ne prennent en compte que les conditions moyennes de la teneur en humidité et de température (**Ramachandran et al., 2018**).

Sur la base de divers essais expérimentaux, plusieurs modèles empiriques et semi-empiriques ont été développés par des individus dont : Lewis (1921), Page (1949) et Newton (Hall 1975), et leurs modèles sont représentés dans la tableau 5.

Outre ces modèles empiriques simples, de nombreux autres ont été développés, par exemple le modèle logarithmique, le modèle parabolique, le modèle exponentiel à deux termes et le modèle de Page modifié (tableau 5). Les modèles susmentionnés ont été développés avec des hypothèses et des conditions aux limites spécifiques (**Ramachandran et al., 2018; Du et al., 2020**).

Tableau 5: Modèles de séchage empiriques

No.	Nom du modèle	Equation	Reference
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$	Bruce, (1985)
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Page, (1949)
3	Modified Page	$MR = \exp(-kt)^n$	Overhults et al., (1973)
4	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Hashim et al., (2014)
5	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	Togrul et Pehlivan, (2002)
6	Two-term	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(k_1t)$	Sacilik, (2007)
7	Two-term exponential	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	Dash et al., (2013)
8	Wang and Singh	$MR = 1 + a + bt^2$	Wang et Singh, (1978)
9	Modified Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	Zenoozian et al., (2008)
10	Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Midilli et al., (2002)
11	Demir et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + b$	Demir et al., (2007)

3.5. Avantages et les inconvénients du séchage

Selon **Saf et Reddam, (2018)**; les avantages et les inconvénients du séchage sont :

➤ Les avantages

- La simplicité de la méthode avec généralement un bon rendement.
- Une durée de conservation des aliments déshydratés qui peut être de plusieurs mois.
- La désactivation des enzymes responsables de la dégradation des aliments.
- L'inhibition de la croissance des micro-organismes grâce à la réduction de l'activité d'eau.
- Sa capacité à être utilisée à des fins commerciales permettant de limiter les pertes de récolte.
- La diminution des coûts financiers et environnementaux liés au transport des marchandises en raison de la réduction massique.

➤ Les inconvénients

Comme tous les traitements thermiques, le séchage peut entraîner, en particulier :

- Des pertes d'arômes, de vitamines et de pigments, des réactions de brunissement, des durcissements superficiels.
- 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.
- Il est coûteux, notamment en énergie.

3.6. Quelques méthodes du séchage appliqué sur la grenade

Les principales publications scientifiques durant les années 2007 à 2020 sur les différentes méthodes de séchage et de prétraitement appliquées sur la grenade sont présentées dans le tableau 6.

De cette synthèse bibliographique, aucune étude n'a été faite sur les prétraitements par champs électriques pulsés (CEP) et par les ultrasons sur le séchage des arilles de la grenade. Ces deux prétraitements vont être étudiés dans les chapitres 4, 5 et 6 de la partie expérimentale.

Tableau 6: Travaux de recherche effectués sur le séchage de la grenade durant la période de 2007 à 2020.

Technique de séchage	Les paramètres	Conclusions majeurs	Référence
Séchage convectif prétraité par blanchiment	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Les conditions de blanchiment étaient: 90°C pendant 30s, 90°C pendant 60s, 100°C pendant 30s et 100°C pendant 60s. ➤ Les expériences de séchage ont été réalisées à 60°C. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Les échantillons blanchis ont séché plus rapidement avec des temps de séchage plus courts. ✓ Le modèle logarithmique a généralement montré un modèle approprié pour les échantillons blanchis. 	(Adetoro et al., 2020)
Séchage à l'air chaud des arilles	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Les expériences de séchage ont été réalisées à 55, 65, 75°C. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Les diffusivités efficaces de l'humidité des arilles étaient de $3,56 \times 10^{-11} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ (à 55°C), $9,39 \times 10^{-11} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ (à 65°C), $1,9330 \times 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ (à 75°C), et l'énergie d'activation était de 80,33 kJ mol⁻¹. ✓ Le séchage a provoqué des changements importants dans la couleur, la dureté. ✓ Les phénoliques totaux des arilles séchés ont été modifiés. ✓ une température de 65°C peut être recommandée pour la déshydratation des arilles de grenade. 	(Süfer et Palazoğlu, 2019)
Influence du prétraitement par déshydratation osmotique sur la méthode de séchage par : lyophilisation et par séchage combinée	<ul style="list-style-type: none"> ➤ La déshydratation osmotique (DO) avec des jus concentrés de: aronia, pomme et de la grenade. ➤ Les arilles ont été séchés par une méthode combinée consistait en un pré-séchage convectif à une température de 60°C pendant 2 h suivi d'un séchage par micro-ondes sous vide avec une puissance de 360 W à 120 W. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ L'utilisation de DO a fourni des arilles séchés avec une douceur caractéristique et une couleur et une complexité aromatique améliorée. ✓ Les méthodes de DO recommandées étaient celles utilisant le jus de la grenade. 	(Cano-Lamadrid et al., 2017)

Séchage par l'air chaud et par micro-ondes	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Le processus de séchage à l'air chaud a été effectué à 50, 60 et 70°C à. ➤ Trois niveaux de puissance micro-ondes (210, 350 et 490 W) ont été étudiés. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ L'augmentation de la température de séchage et de la puissance a raccourci le temps de séchage ✓ Le taux de séchage était plus élevé lorsque les micro-ondes étaient utilisées. 	(Horuz et Maskan, 2015)
Séchage par micro-ondes sous vide	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Le séchage a été effectué à une puissance de 25 à 95 W et une pression de vide de 25 à 195 mm Hg et une masse d'échantillon de 65 à 235 g. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ La diffusivité augmente avec l'augmentation de la puissance des micro-ondes. ✓ Les valeurs effectives de diffusivité de l'humidité (D_{eff}) augmentent à mesure que la puissance des micro-ondes augmente ou que la masse de l'échantillon diminue, tandis que la pression de vide a un effet négligeable. 	(Dak et Pareek, 2014)
Séchage par rayonnement infrarouge	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Les arilles de la grenade ont été séchés à des niveaux de puissance IR de 83, 104, 125 et 146 W. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Les niveaux de puissance affectaient la vitesse et le temps de séchage. ✓ Le temps de séchage est passé de 150 à 60 min lorsque le niveau de puissance infrarouge est passé de 83 à 146 W. ✓ La page, Midilli et <i>al.</i>, et les modèles de Weibull sont mieux. 	(Doymaz, 2012)
Séchage dans un séchoir à armoire	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Le séchage a été effectué à 90°C pendant 90 min, suivi de 70°C pendant 2 h, et enfin 50°C pendant 9h. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Le séchage a affecté négativement la quantité d'anthocyanes. ✓ l'inactivation des polyphénols oxydases (PPO) par un traitement à haute température 	(Jaiswal et al., 2010)
Séchage des arilles de la grenade dans un séchoir à armoire	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Les températures de séchage 50, 55 et 60°C. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Le temps nécessaire pour sécher les arilles de la grenade était de 11, 9 et 6h à 50, 55 et 60°C de température de l'air de séchage, respectivement. Le temps de séchage diminuait avec l'augmentation de la température de l'air de séchage. 	(Kingsly et Singh, 2007)

4. Conservation par le froid

La température est l'un des facteurs les plus importants modulant les processus physiologiques et biochimiques dans les fruits et légumes pendant la vie après la récolte.

Le stockage à basse température est l'une des méthodes de conservation physique les plus efficaces (**Duan et al., 2020**).

Actuellement, la conservation à basse température est la méthode la plus couramment adoptée dans ce domaine. L'utilisation de la réfrigération (généralement entre 0 et 10°C) ou de la congélation (<-20°C) non seulement offre aux consommateurs une plus grande variété de produits, mais augmente également la disponibilité saisonnière et la zone de distribution des aliments qui autrement être disponible uniquement dans leurs zones de production.

En raison des avantages de la réfrigération sur la congélation en termes de fraîcheur des aliments et de faibles dommages de transformation les aliments réfrigérés sont généralement privilégiés par les consommateurs (**Liu et al., 2020**).

4.1. Réfrigération

La réfrigération consiste à conserver les aliments au frais dans un réfrigérateur ou une chambre froide. La température est généralement comprise entre 0 et 10°C, selon le type de produit.

Cette méthode ralentit le métabolisme des végétaux et préserve leur saveur. En général, le principal avantage de la réfrigération est qu'elle n'a aucun effet sur le goût ou la texture des aliments. En ce sens, par exemple, la congélation modifie la structure de certains aliments.

En général, les facteurs influençant la teneur en nutriments des aliments réfrigérés comprennent : la température de stockage, la durée de stockage, l'humidité et la lumière. Parmi eux, la gestion de la température peut être considérée comme l'aspect le plus important pour contrôler les détériorations physiologiques et pathologiques. L'abaissement de la température pendant le stockage est le moyen le plus efficace pour prolonger la durée de conservation et limiter la perte de qualité en réduisant les processus métaboliques tels que la respiration et la transpiration (**Aste et al., 2017**).

Il faut Cependant être prudent avec les légumes et fruits frais car tous ne réagissent pas de la même manière à la réfrigération (**BELAIDI et DOKARI, 2018**). La figure 2 montre l'effet de la température sur la durée de conservation de certains fruits et légumes.

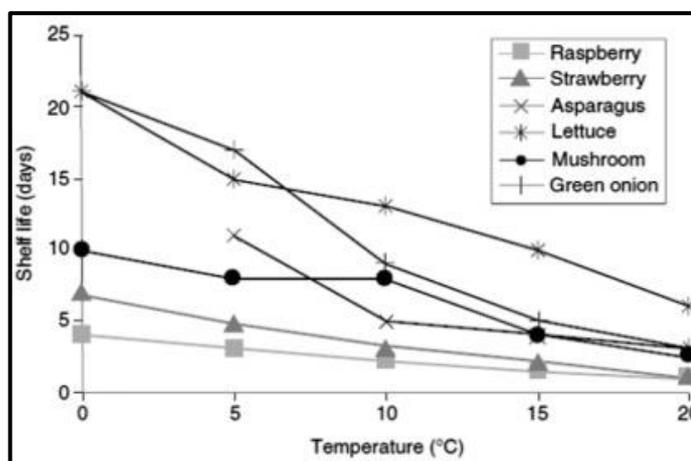


Figure 15: Effet de la température sur la durée de conservation de certains aliments (**Aste et al., 2017**).

Il faut également noter que de nombreux fruits, légumes et plantes ornementales d'origine tropicale ou subtropicale sont sensibles aux basses températures, également supérieures à 0°C. Ces cultures subissent des dommages dus au refroidissement après une période d'exposition à des températures de refroidissement généralement inférieures à 10°C mais supérieures à leurs points de congélation. De plus, certaines cultures horticoles d'origine tempérée sont également susceptibles de subir des dommages dus au refroidissement à des températures inférieures à 5°C (**Aste et al., 2017**).

4.2. Congélation

La conservation par congélation des aliments est utilisée depuis des milliers d'années en raison de la haute qualité des produits (**Li et Sun, 2002**).

La congélation est une méthode populaire pour la conservation à long terme des fruits et des légumes, au cours de laquelle, la solution cellulaire présente dans la matrice alimentaire est refroidie à son point de congélation initial, et un refroidissement supplémentaire provoque la séparation de la molécule d'eau, formant un cristal de glace (**Alabi et al., 2020**).

Les températures usuelles de la conservation par congélation sont comprises entre -10°C et -30°C (**AINSEUR et HAMMACHI, 2019**).

La congélation empêche la croissance des microorganismes, mais elle ne détruit pas ceux qui sont déjà présents dans le produit. En général, la croissance des microorganismes est bloquée à partir de -3°C. La température de sécurité utilisée dans la congélation est de -18°C.

Pour certains produits, tels que les poissons, les crèmes glacées, les températures de congélation conseillées sont plus basses -30°C .

La congélation lente entraîne la formation des cristaux de glace extra-cellulaires qui dilacèrent les parois cellulaires et entraîne un déplacement d'eau du milieu intracellulaire vers le milieu extra-cellulaire avec effondrement des structures cellulaires. Au moment de la décongélation, on assiste à une exsudation importante d'eau et à un ramollissement des tissus, lequel donne un aspect peu présentable au produit décongelé. Ces procédés a donc un certain nombre de limitations, en particulier quand il est appliqué aux produits alimentaires d'origine végétale (BELAIDI et DOKARI, 2018).

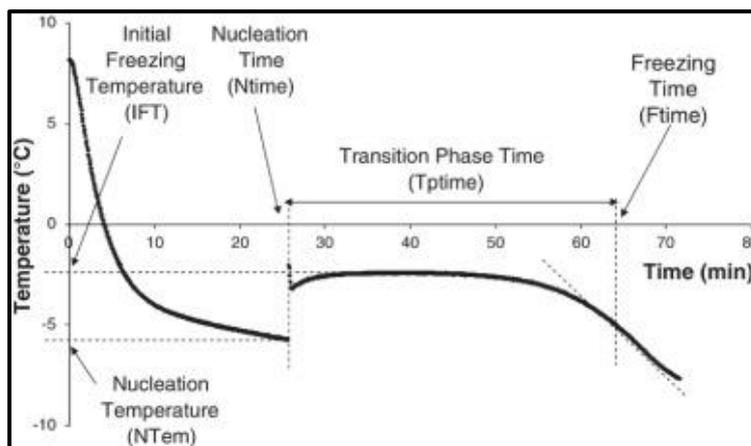


Figure 16: Courbe de congélation typique (Liu et al., 2020).

La qualité finale des fruits et des légumes peut être directement influencées par les caractéristiques des cristaux de glace (c'est-à-dire l'emplacement, la morphologie, la taille et le nombre) formés dans les tissus, qui dépendent en grande partie du taux de refroidissement. Généralement, les processus de congélation sont divisés en deux étapes : l'étape de refroidissement (c'est-à-dire le refroidissement de l'échantillon jusqu'au point de congélation) et l'étape de transition de phase (c'est-à-dire la cristallisation de l'eau).

Les taux de refroidissement diffèrent, provoquant différents niveaux de «super-refroidissement», qui peuvent affecter le taux de nucléation et le taux de croissance des cristaux. Des taux de refroidissement rapides peuvent provoquer des niveaux de "super-refroidissement" élevés, en dessous desquels le taux de nucléation sera plus rapide que le taux de croissance des cristaux et ainsi de nombreux cristaux de glace minuscules et uniformes se formeront dans les tissus et se répartiront uniformément dans les espaces intracellulaires et extracellulaires.

En supposant qu'aucune lésion majeure de la perméabilité de la membrane cellulaire pendant le gel-dégel (ou sa réparation, si elle est altérée), l'eau fondue rentre dans les cellules pendant la décongélation, provoquant leur retour à une morphologie normale. Le tissu sera toujours

intact et la qualité du produit sera mieux maintenue. En revanche, une vitesse de refroidissement lente se traduit par un faible niveau de «super-refroidissement» grâce auquel la vitesse de nucléation sera plus lente que la vitesse de croissance des cristaux (Liu *et al.*, 2020).

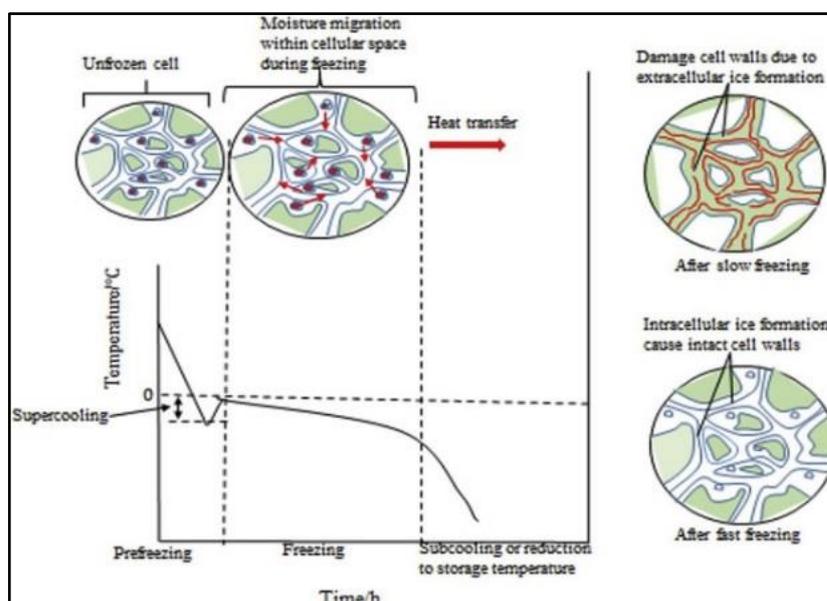


Figure 17: Impact des taux de congélation sur la structure cellulaire des matériaux alimentaires d'origine végétale (Alabi *et al.*, 2020).

4.3. Surgélation

Pour minimiser les phénomènes d'exsudation et l'effondrement des structures cellulaires végétales, il convient d'utiliser le procédé de surgélation qui n'est rien d'autre qu'une congélation accélérée. Dans ce cas, il y a une formation des microcristaux qui n'entraînent pas d'éclatement des structures cellulaires. Ceci permet de minimiser les phénomènes d'exsudation au moment de la décongélation (BELAIDI et DOKARI, 2018).

Ce procédé de surgélation peut être appliqué à la conservation des végétaux. D'un point de vue général, ce sont les procédés thermiques les plus intenses et les plus courts, comme la stérilisation, qui assurent la meilleure préservation des qualités physiques (texture) et organoleptiques des aliments.

La surgélation est un procédé qui transforme brutalement l'eau des denrées alimentaires en glace. Elle cristallise l'eau à l'aide de températures très basses (au-dessous de -30°C) et stabilise ensuite les aliments à -18°C (BELAIDI et DOKARI, 2018)

La surgélation doit intervenir rapidement après la récolte ou la confection des produits. Elle a l'avantage de ne former que de très petits cristaux de glace, évitant ainsi de déchirer l'enveloppe des cellules du produit, contrairement à une congélation lente qui provoque la formation de plus gros cristaux. (BELAIDI et DOKARI, 2018).

4.4. Quelques méthodes de conservation par le froid appliqué sur la grenade

Les principales publications scientifiques durant les années 1998 à 2019 sur les différentes méthodes de la conservation par le froid de la grenade sont présentées dans le tableau 7.

Cette synthèse bibliographique a permis le choix des paramètres de la réfrigération de la grenade qu'ils vont être utilisés dans le chapitre 2 de la partie expérimentale.

Tableau 7: Conservation par le froid de la grenade.

Technique	Les paramètres	Conclusions majeurs	Référence
L'application de mélatonine avant le stockage au froid	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Immersion des fruits dans une solution de mélatonine à 0, 1, 10, 100 et 1000 μM pendant 15 min à 20°C. ➤ Les fruits de la grenade ont été stockés à 4°C (85 à 90% HR) pendant 120 jours. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Les résultats mettent en lumière les effets bénéfiques du traitement à la mélatonine sur l'attribution d'une tolérance au froid chez les fruits de la grenade lors d'un stockage à 4°C pendant 120 jours. 	(Jannatizadeh, 2019)
Le salicyloyl chitosane atténue les blessures dues au froid et maintient la capacité antioxydante des fruits de la grenade pendant le stockage au froid	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Les ont été trempés dans l'eau distillée (témoin), traité avec 2 mM d'acide salicylique, 0,5% de chitosane et 0,57% de salicyloyl chitosane. ➤ Le stockage à 2°C pendant 5 mois des fruits de la grenade. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ En conclusion, la présente étude met en lumière l'impact bénéfique du traitement au salicyloyl chitosane sur l'atténuation des dommages causés par le refroidissement après récolte chez les fruits de la grenade pendant le stockage à 2°C pendant 5 mois. ✓ les fruits de grenade traités avec du salicyloyl chitosane était concomitante avec une augmentation des phénols totaux, des anthocyanes et de l'accumulation d'acide ascorbique résultant en des fruits avec une capacité antioxydante hydrophile et lipophile plus élevée. 	(Sayyari et al., 2016)
Stockage dans un emballage sous atmosphère modifiée	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Les grenades douces ont été stockées dans deux conditions emballages sous atmosphère modifiée différentes. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Pendant le stockage à long terme, une diminution des valeurs L^* et C^* et une augmentation des valeurs h° des grenades ont été trouvées dans tous les traitements. 	(Selcuk et Erkan, 2014)

	<ul style="list-style-type: none"> ➤ les fruits ont été stockés à 6°C et 90–95% HR pendant 120 jours. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Les composés phénoliques totaux, les anthocyanes totaux et l'activité antioxydante étaient toujours plus élevés dans les fruits témoins. 	
Effets de la température et de la durée de stockage sur les réponses physiologiques des fruits de la grenade	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Les fruits de grenade (cv. 'Bhagwa' et 'Ruby') récoltés à maturité commerciale ont été stockés à 5, 7 et 10°C avec 92 ± 3% d'humidité relative (HR), et à 22°C (65 ± 5,5% HR) pendant 16 semaines 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Les réponses physiologiques et la qualité des fruits ont été affectées par les conditions de stockage. ✓ La perte de poids était particulièrement élevée dans les fruits conservés à la température ambiante pendant 4 semaines. ✓ La gravité des troubles physiologiques était plus faible dans les fruits conservés à basse température. ✓ Les cultivars étudiés peuvent être conservés à 5°C et à 92% HR pendant 8 à 12 semaines. 	(Fawole et Opara, 2013)
Effets de la température de stockage et la durée sur les propriétés chimiques, la composition immédiate et composants bioactifs des arilles de la grenade (<i>Punica granatum</i> L.)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Les arilles de la grenade ont été stockés à 1, 4, et 8°C à 95% d'humidité relative pendant 14 jours. ➤ Les anthocyanes, de l'acide ascorbique et la composition ont été mesurées à proximité d'au jour 0, 7, 14 et 15. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ consommation d'O₂ et la production CO₂ ont augmenté à des températures élevées. ✓ Composition nutritionnelle des arilles n'a pas été affectée de manière significative à 1 et 4°C pendant 14 jours. 	(O'Grady, 2014)
Amélioration de la conservation des fruits de la grenade par réchauffement intermittent	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Les fruits ont été stockés à 0°C ou 5°C et à 95% d'humidité relative (HR) pendant 80 jours. ➤ Cycles de réchauffement intermittent (IW) de 1 jour à 20°C tous les 6 jours, période pendant laquelle les fruits ont été stockés à 0°C ou 5°C, suivis d'une période de conservation de 7 jours à 15°C et 70 % HR ont été appliqués. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ le stockage à 0°C était le meilleur traitement pour maintenir la couleur de peau rouge comme à la récolte. 	(Artés et al., 1998)

5. Déshydratation osmotique

Parmi les procédés de conservation des produits végétaux, la déshydratation osmotique présente un intérêt économique et nutritionnel. Cette technique, économe en énergie, est susceptible de prolonger la période de disponibilité des produits alimentaires, et leur confère des propriétés sensorielles nouvelles et appréciées. Elle permet ainsi aux acteurs de la filière agroalimentaire d'écouler leurs productions à de meilleurs prix et aux consommateurs d'en disposer tout au long de l'année. Cette technique est un outil facile à mettre en place, surtout dans les pays en voie de développement, en raison de son faible coût (Ahmed et al., 2016).

L'eau est le principal facteur affectant la stabilité chimique et microbiologique des aliments. Il est également responsable de la réception des stimuli sensoriels par les consommateurs. En réduisant l'activité de l'eau, la durée de conservation des produits alimentaires augmente et la stabilité peut être prolongée. La déshydratation osmotique est un processus qui consiste à éliminer partiellement l'eau en immergeant le tissu végétal dans une solution hypertonique (tels que le sucre et les sels). Une substance osmotique est introduite à la place de l'eau qui est extraite du matériau cellulaire et la solution hypertonique remplit l'espace entre la paroi cellulaire et la membrane cellulaire. La force motrice du processus est la différence de concentration entre la solution osmotique et le liquide interstitiel (Alakali et al., 2006; Torres et al., 2012; Ciurzyńska et al., 2016).

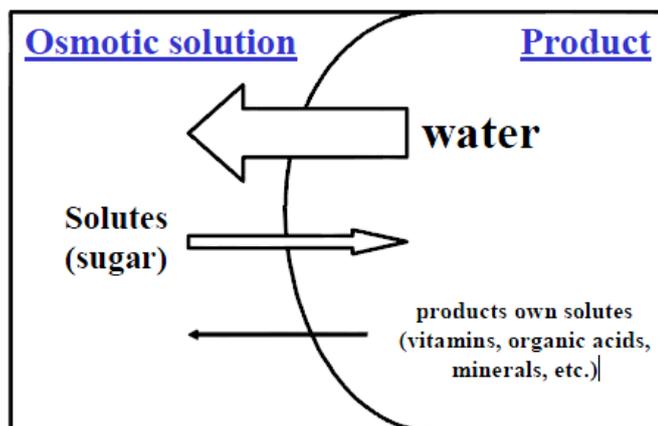


Figure 18: Principes de la déshydratation osmotique (Yetenayet et Hosahalli, 2010).

Selon Yadav et Singh, (2014); les avantages de la déshydratation osmotique sont les suivants:

- C'est un processus d'élimination de l'eau à basse température et donc une perte minimale de la couleur et de la saveur.
- La rétention d'arôme est plus importante lorsque du sucre ou du sirop de sucre est utilisé comme agent osmotique.

- Le brunissement enzymatique et oxydatif est évité car les morceaux de fruits sont entourés par les sucres, ce qui permet de conserver une bonne couleur avec peu ou pas d'utilisation de dioxyde de soufre.
- L'élimination de l'acide et l'absorption de sucre par les morceaux de fruits donnent un produit plus doux que le produit conventionnellement séché.
- Il élimine partiellement l'eau et réduit ainsi la charge d'élimination de l'eau au niveau du séchoir.
- La consommation d'énergie est bien moindre car aucun changement de phase n'est impliqué.
- Il augmente la densité solide en raison de l'absorption solide et aide à obtenir un produit de meilleure qualité en lyophilisation.
- Si le sel est utilisé comme agent osmotique, une teneur en humidité plus élevée est autorisée à la fin du séchage car l'absorption de sel influence le comportement de sorption de l'eau du produit.
- La qualité texturale du produit est meilleure après reconstitution.
- La durée de conservation du produit est considérablement améliorée.
- Des équipements simples sont nécessaires pour le processus.

PARTIE EXPÉRIMENTALE

Chapitre 1:

Valorisation de la grenade

Valorisation d'une variété de la grenade de la wilaya de Batna (l'Algérie)

Résumé

La présente étude a été menée pour déterminer les caractérisations morphologiques, chimiques et organoleptiques des fruits et des arilles et l'activité biologique (activité antioxydante, teneur en polyphénols) d'un cultivar de la grenade (*Punica granatum* L.) de la Wilaya de Batna (L'Algérie).

Les arilles ont donné une teneur en eau de 80,58 % et 19,42% de matière sèche et ont montré des teneurs élevées en anthocyanes totaux ($490,4 \pm 4,2$ mg/L). Cependant, les arilles ont une couleur rouge. Concernant les polyphénols totale, la quantité totale variait de $390,4 \pm 2,4$ mg/100ml. De plus, le jus des arilles de la grenade possède une activité antioxydante très élevée ($188,7 \pm 3,9$ mg/L). Les quantités de K, Na, Mg et le Ca était le plus élevé parmi les autres minéraux du fruit.

Mots-clés : Grenade, Arilles, Jus, Propriétés physico-chimiques.

1. Introduction

La grenade (*Punica granatum* L.) est une culture traditionnelle, cultivée dans le monde entier dans les régions subtropicales et tropicales. On pense qu'il est originaire d'Asie centrale, en particulier de l'Iran et des pays voisins, d'où il s'est propagé au reste du monde (**Teixeira da Silva et al., 2013**). Aujourd'hui, les pays méditerranéens et asiatiques sont les principaux centres de culture commerciale de la grenade (**Verma et al., 2010**). La production de la grenade est d'une grande importance, car chaque partie du fruit (par exemple, la peau, les arilles et les graines) est riche en composés bioactifs (CBA) (**Lorenzo Rodriguez et al., 2018**). Les CBA offrent de nombreux avantages pour la santé adaptés à diverses applications pour l'alimentation, les produits pharmaceutiques, les cosmétiques (**Caligiani, 2016**), la médecine et les nanotechnologies (**Karimi et al., 2017**) et peuvent donc être considérés comme un super aliment (**Fidelis et al., 2017; Sreekumar et al., 2014**).

Les propriétés chimiques et bioactives de la grenade dépendent du type de cultivar, des lieux de croissance et des climats, ainsi que de la maturité à la récolte (**Kalaycioğlu et Erim, 2017**). La portion comestible des fruits de la grenade se compose de 29 à 54% d'arilles avec environ 80% de jus et 20% de graines (**Valero et al., 2015**). Le jus des arilles contient 85% d'eau, 10% de sucres totaux (glucose, saccharose et fructose), 1,5% de pectine, acides organiques (ascorbique, citrique, acide malique), acides gras (Acide linoléique conjugué et acide linoléique), amino acides (proline, valine et méthionine) et d'autres alcools (**Akpınar-Bayizit et al., 2012; Valero et al., 2015**).

Des rapports ont montré que la grenade a plusieurs fonctionnalités thérapeutiques: (**Danesi et Ferguson, 2017**), antimutagène (**Cano-Lamadrid et al., 2016**), prévention du cancer et traitement du cancer (**Lansky et Newman, 2007**), antioxydant (**Kalaycioğlu et Erim, 2017**), les activités anti-inflammatoires, hépato-protectrices et neuroprotectrices (**Rahmani et al., 2017**) et d'autres effets favorables à la santé (**Viuda-Martos et al., 2010**).

Le travail actuel implique la caractérisation de la variabilité physicochimique de la grenade de la région d'Ain touta wilaya de Batna. La caractérisation a été répétée pendant trois ans afin d'évaluer la stabilité des caractères par rapport aux variations agro-environnementales annuelles. La caractérisation physicochimique a impliqué des mesures de la masse et de la taille des fruits, des arilles et des graines, une évaluation colorimétrique des arilles et du jus, la teneur en eau, la réfractométrie du jus, l'acidité titrable, les phénols totaux, les anthocyanes, l'activité antioxydante et les minéraux.

2. Matériaux et méthodes

2.1. Matériel végétal

Des fruits de la grenade ont été collectés dans une ferme commerciale située à Ain touta (Est de l'Algérie) (figure 19). La sélection de la grenade de cette région a été basée sur leur qualité et leurs caractéristiques intéressantes soit pour la consommation fraîche (graine molle, couleur attrayante, grande taille, bon saveur) soit pour l'industrie. Les grenadiers étaient cultivés dans des conditions homogènes. La récolte des fruits au début du novembre, en évitant les fruits abîmés afin d'éviter l'inclinaison des résultats.

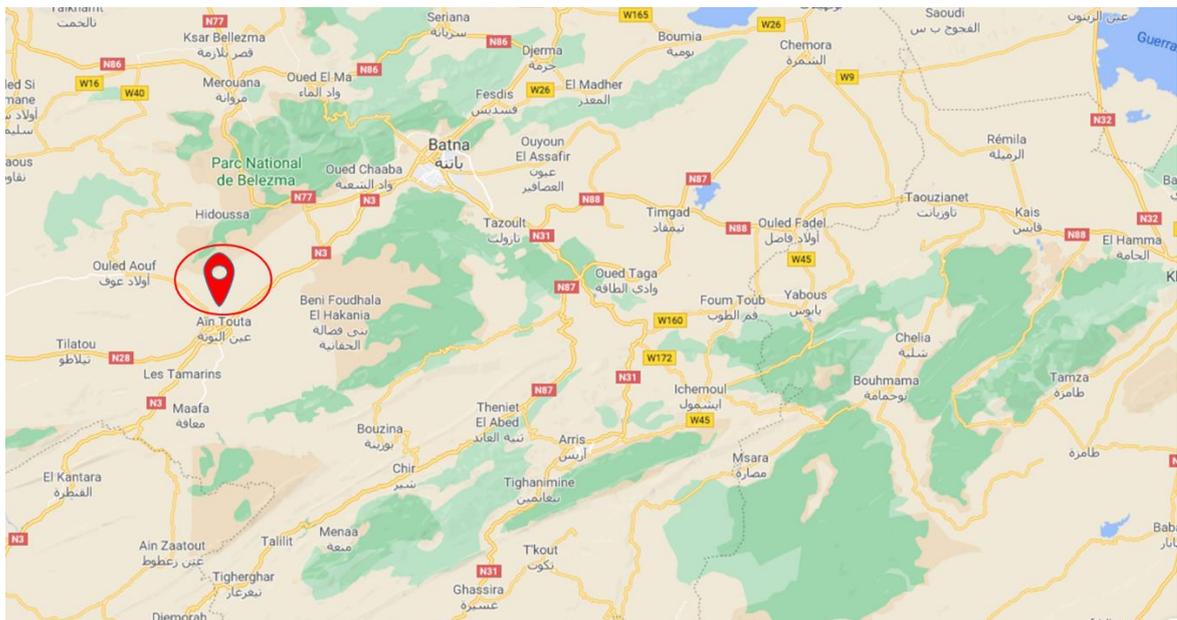


Figure 19: Carte montrant la localisation du domaine expérimental à Ain Touta– Batna

2.2. Propriétés physiques

2.2.1. Propriétés morphologiques

Pour évaluer les attributs de la qualité des fruits et des arilles, les variables physiques suivantes ont été mesurées: poids du fruit et d'arille (g), diamètre équatorial (mm), longueur totale du fruit et d'arille (mm); les mesures ont été effectuées sur cinq échantillons. Le diamètre,

la longueur des fruits ont été mesurés avec un pied à coulisse numérique électronique Mitutoyo (modèle CD-15 DC, Angleterre, avec une précision de 0,01 mm). Les poids des fruits et des arilles ont été mesurés à l'aide d'une balance numérique Sartorius (modèle BL-600, avec une précision de 0,01 g).

2.2.2. Caractérisation colorimétrique

La couleur des arilles et la couleur du jus a été déterminée à l'aide d'un chromomètre (Minolta, CR-300X, Japan). La couleur a été évaluée selon la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) et exprimée en L^* , a^* , b^* .

L^* indique la luminosité, prenant des valeurs comprises entre 0 et 100 (noir-blanc, respectivement) et a^* et b^* sont les coordonnées chromatiques, les coordonnées vert-rouge et bleu-jaune, respectivement comme décrit par **McGuire, (1992)**. a^* prend des valeurs positives pour les couleurs rougeâtres et négatives pour les verdâtres, tandis que b^* prend des valeurs positives pour les couleurs jaunâtres et négatives pour les bleutées.

La couleur des arilles et du jus a été mesurée directement dans une boîte de pétri. Les résultats des couleurs internes (moyenne \pm erreur standard) étaient la moyenne de cinq déterminations pour chaque échantillon.

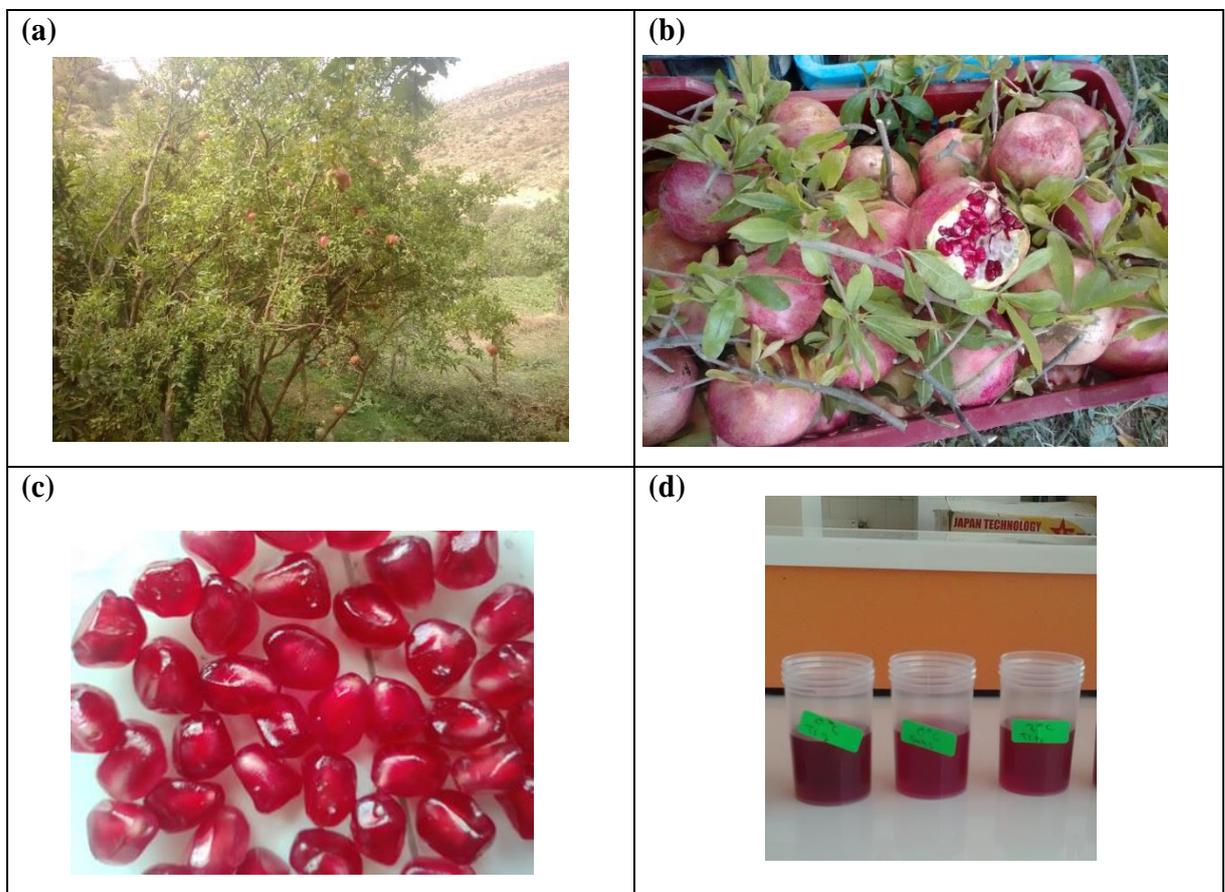


Figure 20: Matériel végétal étudié: a) l'arbre, b) le fruit, c) les arilles et d) le jus.

2.3. Propriétés chimiques et biochimique

2.3.1. Teneur en eau

La teneur en eau a été mesurée en utilisant une méthode par séchage de 5 g des arilles frais à $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ pendant 24h dans un four sec (Memmert) jusqu'à poids constant (AOAC, 2005).

2.3.2. Solides solubles totaux, pH et acidité titrable totale

Les solides solubles totaux (TSS) ont été mesurés avec un réfractomètre numérique Atago (modèle N-20; Atago, Bellevue, Washington, USA) à 20°C avec des valeurs exprimées en $^{\circ}\text{Brix}$.

L'acidité titrable (AT) a été déterminée par un titrage acide-base en utilisant du NaOH 0,1 N jusqu'à pH 8.1, les valeurs ont été exprimées en gL^{-1} d'acide citrique. Enfin, l'indice de maturité (IM), qui est un rapport TSS/AT a également été calculé pour chaque échantillon. Les résultats (moyenne \pm erreur standard) étaient la moyenne de cinq déterminations.

2.3.3. Activité antioxydante et teneur en polyphénols totaux

L'activité de piégeage des radicaux libres a été évaluée en utilisant la méthode DPPH (radical 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle) comme décrit par **Calín-Sánchez et al., (2013)**.

En bref, chaque jus de la grenade a été dilué avec MeOH (1:5), puis centrifugé à 15 000 tr/min pendant 10 min. une quantité de 10 μL du surnageant ont été mélangés avec 40 μL de MeOH et ajoutés à 950 μL d'une solution de DPPH 0,094 mM. Après 50 min de réaction, l'absorbance a été mesurée à 515 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Vis Uvikon XS (Bio-Tek Instruments, Saint Quentin Yvelines, France). L'analyse a été réalisée en triple et les résultats (moyenne \pm erreur standard) ont été exprimés en mM Trolox.

La teneur totale en polyphénols (TP) a été quantifiée à l'aide du réactif de Folin-Ciocalteu (**Calín-Sánchez et al., 2013**). En bref, pour chaque échantillon, 5 ml de jus ont été homogénéisés dans 5 ml de MeOH/eau (80 :20v/v) puis centrifugés à 15 000 tr/min pendant 15 min à 4°C . Plus tard, 50 μL d'échantillon ont été mélangés avec 2,5mL de réactif Folin-Ciocalteu (1:10v/v), 450 μL de tampon phosphate (pH 7,8) et 2 ml de carbonate de sodium (75gL^{-1}). Ensuite, l'absorption a été mesurée à 760 nm en utilisant un spectrophotomètre UV-Vis Uvikon XS (Bio-Tek Instruments, Saint Quentin Yvelines, France). Les résultats (moyenne \pm erreur standard) ont été exprimés en mg d'acide gallique 100ml du jus.

2.3.4. Teneur totale en anthocyanes (TAC)

La teneur totale en anthocyanes (TAC) a été évaluée en appliquant la méthode décrite par (**Hmid et al., 2018**) utilisant deux systèmes des tampons: un tampon d'acétate de sodium pH

4,5 (0,4 M) et un tampon de chlorure de potassium pH 1,0 (25mM). En bref, 0,4ml de jus de grenade a été mélangé avec 3,6ml de tampons correspondants et l'absorbance a été déterminée à 510 et 700 nm. L'eau a été utilisée comme un blanc. L'absorbance (A) a été exprimée comme suit:

$$A = (A_{520 \text{ nm}} - A_{700 \text{ nm}})_{\text{pH}1,0} - (A_{520 \text{ nm}} - A_{700 \text{ nm}})_{\text{pH}4,5}$$

Le TAC de jus a été présenté en mg de cyanidine-3-glucoside L⁻¹ de PJ et a été déterminé en utilisant l'équation ci-dessous:

$$TAC = [A \times MW \times DF \times 100] \times \frac{1}{MA} \quad (11)$$

Avec: A: absorbance, MW: poids moléculaire (449,2 g mol⁻¹), DF: facteur de dilution (10), MA: absorptivité molaire du cyanidine-3-glucoside (26.900).

2.3.5. Concentration en nutriments minéraux

La méthode d'extraction des sels minéraux a été mise au point au laboratoire à partir des méthodes de références (AOAC, 2003). Elle comprenait les étapes d'incinération, de dissolution, de filtration.

Les arilles de la grenade (0,5 g) a été amenée dans un four à moufle (Hobersal, Barcelone, Espagne) modèle 12 PR / 300 série 8B et digérée à 450°C pendant 6 h. Les cendres ont été mélangées avec 4 ml de HCl (50%, v/v) et transférées dans une fiole jaugée dans les dilutions 1:25 et 1:50, préparées en utilisant de l'eau d'ionisée de très haute pureté. Les échantillons ont été conservés à 4°C jusqu'à l'analyse.

La détermination de Ca, Mg, K, Na, Cu, Fe, Mn et Zn dans des échantillons précédemment minéralisés a été effectuée en utilisant un spectromètre d'absorption-émission atomique Unicam Solaar 969 (Unicam Ltd., Cambridge, Royaume-Uni). K et Na ont été analysés par émission à flamme. Des courbes d'étalonnage, avec une plage de concentration comprise entre 0 et 10,0 mg L⁻¹ pour Ca, Mg, K et Na et entre 0 et 2,0 mg L⁻¹ pour Fe, Cu, Mn et Zn, ont été utilisées pour la quantification des minéraux et a montré une bonne linéarité ($r^2 \geq 0,987$). Les analyses ont été effectuées en cinq répétitions ($n=5$) et les résultats ont été exprimés en tant que moyenne \pm erreur standard en unités de mg/100g.

2.4. Analyses statistiques

L'analyse de variance (ANOVA) a été réalisée en utilisant les procédures General Linear Models (GLM) du logiciel SigmaPlot\SPW11 (version 11, 2008, USA). Les expériences ont été effectuées en triple et les moyennes des trois ensembles de données sont présentées. Les

moyennes ont été séparées par la différence la moins significative selon les multiples plages de Duncan.

3. Résultats et discussion

3.1. Paramètres morphologiques

Les propriétés physiques des fruits telles que le poids, le volume et la teneur en jus sont importantes du point de vue du marketing car les attributs influencent les préférences des consommateurs (**Fawole et Opara, 2013**).

Les principales caractéristiques morphologiques des fruits et des arilles retirés lors de cette étude sont décrites dans le tableau 8. Le poids des fruits variait de $368,3 \pm 36,7$ g, le diamètre des fruits de $92,2 \pm 4,3$ mm tandis que la longueur des fruits variait de $82,3 \pm 3,8$ mm.

Fawole et Opara, (2013); ont montré que la variation du poids de fruit dépend du cultivar et du climat. La petite différence observée entre nos travaux et ceux de (**Hmid et al., 2018**) peut être expliquée par la variabilité des conditions climatiques et de la variété.

Dans un récent rapport de **Fawole et Opara, (2013)**; pour le cultivar 'Bhagwa' cultivé en Afrique du Sud, le poids des fruits est passé de 322 g à la récolte commerciale. Les dimensions linéaires du fruit à la récolte sont passées de 60 à 84 mm pour le diamètre du fruit et de 54 à 75 mm pour la longueur du fruit.

Tableau 8: Principales propriétés physiques des fruits et des arilles

	Poids	Largeur (mm)	Longueur (mm)
Fruit	$368,3 \pm 36,7$ g	$92,2 \pm 4,3$	$82,3 \pm 3,8$
arille	$184,7 \pm 41,6$ mg	$7,3 \pm 0,097$	$11,56 \pm 0,27$

L'aspect physique des arilles est décrit dans le tableau 8. Cependant, le poids, le diamètre et la longueur des arilles sont respectivement: $184,7 \pm 41,6$ mg, $7,3 \pm 0,097$ mm et $11,56 \pm 0,27$ mm. **Fawole et Opara, (2013)**; ont rapporté que les arilles de fruits constituaient environ 50-66% du poids des fruits pendant la plupart des stades de développement des fruits. Les arilles sont composés de pulpe, de jus et des graines avec une composition élevée en fibres et d'autres composés tels que les sucres et les polyphénols.

Les paramètres internes mesurés sur les arilles de la grenade déterminent la valeur économique de ce fruit et sont des facteurs importants pour les producteurs, le marché et l'industrie (**Passafiume et al., 2019**).

3.2. Couleur des arilles et du jus

La couleur est un facteur important affectant la commercialisation et la préférence des consommateurs pour les fruits, y compris les grenades. Cependant, il n'y a pas de corrélation entre la couleur de la peau externe (pelage) et la couleur des arilles à l'intérieur des fruits (**Fawole et al., 2020**). Au cours du développement et de la maturation des fruits, les arilles passent du blanc au rouge rosâtre tandis que la pelure du fruit passe du vert au jaune verdâtre et enfin au jaune brunâtre avec des taches rougeâtres (**Fawole et Opara, 2013**).

La couleur du jus est un attribut de qualité important, en particulier dans le secteur de la transformation du jus, car elle influence l'attrait et la préférence des consommateurs (**Fawole et al., 2020**). Selon **Fawole et al., (2020)**; l'absorbance de la couleur du jus de la grenade est une indication des anthocyanes qui sont des pigments végétaux absorbant la lumière.

Tableau 9: Paramètres de la couleur (CIE L* a* b*) des arilles et du jus de la cultivar de la grenade étudié.

	a*	b*	L*
Arilles	24,41 ± 1,3	7,80 ± 2,6	40,27 ± 1,5
Jus	21,2 ± 0,82	12,2 ± 1,8	57,1 ± 0,33

Lorsqu'ils ont été évalués dans le système CIE L* a* b*, les indices de la couleur ont varié de manière significative entre les arilles et le jus (tableau 9). Sur la base de la légèreté (L*=0 indique le noir et L*= 100 indique le blanc diffus), les résultats indiquent que le jus et les arilles de ont une couleur claire. Les indices (a*) et (b*) qui indiquent respectivement la rougeur et le jaune ont montré des différences entre les arilles et le jus. Les arilles avaient la valeur de la couleur de rougeur la plus élevée tandis que le jus présentait la valeur la plus faible.

3.3. Solides solubles totaux(TSS), pH, acidité titrable (AT) et indice de maturité (IM)

Les solides solubles totaux (TSS), qui sont principalement constitués des sucres, ont augmenté de manière significative au cours des trois principaux stades de développement des fruits. L'acidité titrable (AT) est un attribut de qualité important du jus de la grenade (**Fawole et Opara, 2013**). La diminution des niveaux d'AT pendant le développement des fruits avec une augmentation concomitante de la teneur en TSS est un processus inhérent pendant la croissance et le développement de la grenade affecte la saveur caractéristique du jus (**Kulkarni et Aradhya, 2005**). Le rapport (TSS/AT), également appelé indice de maturité (IM) par **Hernandez et al., (1999)**, est couramment utilisé pour définir le «goût» des fruits de la grenade pendant le développement (**Shwartz et al., 2009**). Les valeurs de TSS, AT, IM et pH du jus obtenu en pressant manuellement les arilles de la grenade sont présentées dans le tableau 10.

Tableau 10: Principaux paramètres physicochimiques

TSS (°Brix)	AT (g/100ml)	IM	pH	Teneur en eau (%)
16,0 ± 2,7	0,42 ± 0,20	38,09 ± 0,64	3,54 ± 0,04	80,58 ± 0,2

Koppel et Chambers (2010); ont étudié les profils de la saveur des jus de la grenade commercialisés aux États-Unis et a conclu que les jus des cultivars aigres ou aigres-doux ont un profil plus complexe et plus attrayant pour les consommateurs que les cultivars sucrés. Ce paramètre ainsi que la teneur en TSS déterminent l'indice de maturité des fruits (TSS/AT) qui est responsable du goût et de la saveur de la grenade (**Tehranifar et al., 2010**). L'indice de maturité, influençant le goût et la saveur de la grenade, est l'un des facteurs importants utilisé pour classer les cultivars de la grenade (**Zaouay et al., 2012**). Les valeurs de pH, TSS et MI pour ces variétés de grenade étaient similaires à celles rapportées par (**Nuncio-Jáuregui et al., 2014**).

3.4. Activité antioxydante (ACT), polyphénols totaux (TP) et les anthocyane

La grenade a été propagée comme un aliment riche en polyphénols avec des effets bénéfiques pour la santé en raison de sa capacité antioxydante élevée, elle est donc communément appelée «superfruit». En raison des niveaux élevés d'acides phénoliques, des flavonoïdes et d'autres composés polyphénoliques, la grenade pourrait être utilisée comme piègeur efficace de plusieurs espèces réactives de l'oxygène. En d'autres termes, composé phénolique naturel peut inhiber l'oxydation des aliments et prolonger la durée de conservation et la qualité des produits alimentaires. De plus, l'industrie alimentaire souhaite remplacer les composés chimiques par des composés naturels afin de promouvoir la sécurité alimentaire (**Derakhshan et al., 2018**).

Les résultats de l'ACT mesurés par la méthode DPPH et les TP sont affichés sur le tableau 11. Le test de piégeage des radicaux DPPH est généralement appliqué pour déterminer la capacité des antioxydants à piéger les radicaux libres a été mesuré en fonction du degré de décoloration du mélange. Comme le montre dans le tableau 11, l'activité antioxydante et phénolique totale du jus de la grenade sont respectivement 188,7±3,9 mg/L et 390,77±2,4 mg/100ml. Des résultats similaires ont été obtenus par (**Hmid et al., 2018**)

La composition en anthocyanes est un paramètre de qualité important dans les fruits de la grenade, en raison de l'importance de ces composés dans la couleur des jus. La teneur en anthocyanes totales est présentée dans le tableau 11. Le niveau d'anthocyanine trouvés dans notre jus était inférieurs à ceux rapportés pour les génotypes iranien et chilien (**Alighourchi et Barzegar, 2008; Sepúlveda et al., 2010; Fawole et Opara, 2013; Zaouay et al., 2012**). Les anthocyanes de la grenade varient considérablement selon les cultivars, la maturité, la zone

de production et les conditions saisonnières. En tant que pigments, ils sont presque exclusivement responsables des couleurs rouges, bleues et violettes (Fawole et Opara, 2013).

Tableau 11: Activité antioxydante, phénolique totale et les anthocynes

Teneur en polyphénols	Activité antioxydante	Teneur totale en anthocyanes
390,77 ± 2,4 (EAGmg/100ml)	188,7 ± 3,9 (Trolox mg/L)	490,4 ± 4,2 mg/L

3.5. Contenu minéral

La teneur en minéraux dans les arilles de la grenade est indiquée dans le tableau 12; il est important de souligner que le matériel analysé comprenait seulement les arilles. Les quantités de potassium, de calcium et de sodium étaient jugées les plus élevées dans les arilles de la grenade. D'après un examen, il est évident que le potassium est l'élément le plus abondant dans les arilles, suivi du Na et du Ca.

Les autres éléments, par ordre décroissant de quantité (mg/100 g) étaient le Mg, le Fe, le Zn et le Cu et leurs valeurs respectives dans les arilles étaient similaires à la valeur rapportée par (Al-Maiman et Ahmad, 2002; Nuncio-Jáuregui et al., 2015). L'exception était le fer, qui était de 2,25 mg/100 g contre 1,88 dans les arilles. Cette variation pourrait être attribuée à des différences dans les cultivars, la nutrition des plantes, le climat et les conditions du sol.

Tableau 12: Teneur en minéraux (mg/100g) dans les arilles de la grenade.

Elément	Mn	Mg	Ca	Zn	Cu	Fe	K	Na
Teneur en (mg /100g)	1,181±0,27	11,4±4,4	12,33±2,6	1,01±0,51	0,03±0,01	2,25±1.05	235,00±2,42	61±4,8

4. Conclusion

Les résultats présentés dans ce travail démontrent clairement l'intérêt de la valorisation de ce fruit, non seulement pour la consommation fraîche, mais au sens le plus large pourrait également être très utile dans les industries de l'alimentation et de la santé.

Le poids, la couleur visuelle des fruits et des arilles, les teneurs en anthocyanes, l'activité antioxydante, la teneur en magnésium, potassium et manganèse ont été considérées comme une qualité importante dans le choix de ce fruit.

Ainsi, il pourrait utiliser la couleur visuelle des fruits et des arilles et le rapport TSS/TA pour identifier les fruits de haute qualité et déterminer la date de la récolte appropriée.

On s'attend à ce que ces résultats soient précieux pour les producteurs, en particulier dans leur choix des fruits de la grenade entant que produit sain riche en composés bioactifs.

D'après les résultats trouvés dans cette étude; la grenade de la région de Batna possède une meilleure qualité. Cependant, des recherches supplémentaires sont encore nécessaires pour faire la classification de cette vérité.

Chapitre 2:
Conservation par le froid
de la grenade

Effets de la température et de la durée de réfrigération sur les propriétés physico-chimiques, la composition de certain composant bioactif des arilles de la grenade

Résumé

Dans cette étude les effets de la température de stockage au froid sur les propriétés physico-chimiques et l'activité biologique (activité antioxydante, teneur en polyphénols) de la grenade (*Punica granatum* L.) ont été étudiés.

Les fruits de la grenade ont été stockés à -1, 0, 3 et 6°C à 85-90% d'humidité relative pendant 4 mois. Les fruits stockés aux différentes températures ont été retirés du stockage après chaque 15 jour et maintenues dans les conditions ambiantes. Les anthocyanes, les polyphénols, l'activité antioxydante, TSS, AT, pH et la couleur ont été mesurés chaque 15 jour pendant 4 mois.

Les symptômes de blessure par le froid chez les fruits de la grenade se sont manifestés par un brunissement externe de la peau et un brunissement du segment interne. La composition nutritionnelle des arilles n'a pas été significativement affectée pendant les premiers 10 jours. La température n'a pas affecté les solides solubles totaux (TSS), mais a réduit AT.

Mots clés: Grenade, Conservation par froid, Température.

1. Introduction

La production des fruits de la grenade en Afrique du Sud a connu une croissance énorme au fil des ans avec une augmentation de 40% et 56% de la production en 2014 et 2015, respectivement et une augmentation de 31% des exportations totales en 2015 (**Fawole et al., 2020; Sason et Nussinovitch, 2020**). L'Algérie est l'un des principaux producteurs de la grenade des pays méditerranéens avec une production annuelle totale de 717,063 t à 790,374 t ces dernières années (**Meziane et al., 2016**).

Les fruits sont très sensibles aux réactions biochimiques, enzymatiques et microbiennes qui réduisent la durée de conservation. Les fruits de la grenade ont une courte durée de conservation lorsqu'ils sont stockés à la température ambiante (**Aghdam et al., 2020**). Plusieurs traitements ont été proposés pour prolonger le stockage et la durée de conservation des fruits de la grenade tels que le stockage au froid (**Adiletta et al., 2019**). L'entreposage au froid est largement utilisé pour prolonger la durée de vie des fruits et des légumes après la récolte, tout en maintenant la qualité sensorielle et nutritionnelle (**Jannatizadeh, 2019; Sayyari et al., 2016**).

Les grenades, lorsqu'elles sont stockées à la température ambiante, entraînent une réduction de la durée de conservation par accélération du processus de mûrissement, de la dessiccation et de la détérioration, ce qui rend nécessaire le stockage des fruits à basse température. Les symptômes se manifestent par une décoloration brune de la peau, des piqûres superficielles et une sensibilité aux organismes. Les symptômes internes comprennent une couleur d'arille pâle et une décoloration brune des segments blancs séparant les arilles (**Barman et al., 2011**). Cette condition limite l'acceptabilité des consommateurs, entraînant finalement une perte économique pour les producteurs et les exportateurs (**Fawole et al., 2020**).

Les fruits de la grenade, endémiques aux climats subtropicaux, ne peuvent pas simplement être stockés à basse température, en raison du risque de blessure par le froid (Sayyari et al., 2016; Mincuzzi et al., 2020).

Le principal objectif de cette étude était d'étudier l'effet de la température (-1, 0, 3 et 6°C) et de la durée de stockage sur les propriétés physico-chimiques et l'activité biologique (activité antioxydante, composants bioactifs) des fruits de la grenade pendant le stockage au froid.

2. Matériels et méthodes

2.1. Matériel végétal

Les fruits de la grenade (*Punica granatum* L.) ont été récoltés à la main à maturité commerciale dans un verger situé dans la région d'Ain touta dans la wilaya de Batna, en Est de l'Algérie.

Les fruits ont été emballés dans des caisses et transportés dans une voiture dans le même jour au Département de Technologie Alimentaire, Institut des Sciences Vétérinaires et des Sciences Agronomiques, Université Batna 1.

2.2. Conditions de traitement et de stockage

Les fruits ont été triés pour les défauts, les fissures et l'uniformité avant la conservation à -1, 0, 3 et 6°C à 85-90% HR de stockage au froid. L'échantillonnage pour l'analyse des attributs physico-chimiques a été effectué au hasard pendant 4 mois d'intervalle de 10 jours pendant le premier mois et chaque 15 jours pour le reste de la durée; en prélevant un échantillon de 3 fruits de chaque traitement (température -1, 0, 3 et 6°C). Les fruits ont été sortis de réfrigérant et placés dans des conditions ambiantes (22°C).

Les fruits de la grenade ont été traités à la main en les coupant pour éliminer les arilles (sans endommager les arilles). Pour les analyses physico-chimiques et les composants bioactifs; 200 g des arilles ont été pressés. Pour chaque échantillon du jus des arilles pressé, 50 ml ont été utilisés pour des analyses physico-chimiques, stockés à 5°C jusqu'à ce que nécessaire. D'autre par 20 ml du même jus ont été utilisés pour les analyses des composants bioactifs et l'activité antioxydante stockés à -30°C à l'aide d'un ultra- Congélateur basse température (U725 Innova, New Brunswick Scientific, Angleterre).

2.3. Acidité titrable, pH et solides solubles totaux

L'acidité titrable (AT) du jus de la grenade de 3 échantillons de fruit pour les différentes températures (-1, 0, 3 et 6°C) a été déterminée potentiométriquement par un titrage avec NaOH 0,1 N jusqu'à un point final de pH 8,2. L'acidité titrable a été exprimée en cent grammes d'acide citrique par un litre de PJ brut (100g mL^{-1}). Les solides solubles totaux (TSS) de PJ ont été mesurés à l'aide d'un réfractomètre numérique exprimé en °Brix. Les valeurs du pH ont été déterminées à la température ambiante en utilisant un pH-mètre étalonné (Crison, modèle 00924, Barcelone, Espagne).

2.4. Couleur des arilles et du jus

La couleur de l'échantillon en triple des arilles et du jus des arilles a été mesurée dans une boîte de pétri. La couleur a été mesurée à l'aide d'un colorimètre numérique (Minolta, CR-300X, Japon) sur la base des systèmes de la couleur L*, a* et b* par la Commission internationale de l'éclairage (CIE). Les coordonnées de la couleur L*, a* et b* pour la clarté, la rougeur/la verdure et le jaunissement/le bleu, respectivement, ont été enregistrés pour chaque échantillon et les moyennes de toutes les mesures ont été déterminées.

2.5. Teneur totale en anthocyanes

La teneur en anthocyanes des échantillons a été déterminée en utilisant la méthode du pH différentiel décrite par (Sudhakar et al., 2018). Des aliquotes de PJ ont été portées à pH 1,0 et 4,5 et laissées à l'équilibre pendant 1h. L'absorbance de chaque solution équilibrée a ensuite été mesurée à 520 nm et 700 nm en utilisant un spectrophotomètre UV-Vis (Shimadzu 1100, Japon). La teneur en pigments a été calculée sur la base du cyanidine-3-glucoside avec un poids moléculaire de 445,2 et un coefficient d'extinction de 29 600.

2.6. Contenu phénolique total

La teneur en phénols totaux a été déterminée en utilisant la méthode de Folin – Ciocalteu (Folin–C) telle que décrite par (Fawole et al., 2012). L'extrait de PJ dilué (50 μL) a été mélangé avec 450 μL de méthanol à 50% dans le tube à essai, suivi par l'ajout de 500 μL de réactif Folin–C. Après 2 min, 2,5 ml de la solution de carbonate de sodium ont été ajoutés au mélange d'extrait méthanolique de PJ et de Folin-C.

Le mélange a été vortexé et incubé dans une chambre sombre pendant 40 min à la température ambiante (25°C). L'absorbance du mélange en solution a été mesurée à 725 nm en utilisant un spectrophotomètre UV-vis (Thermo Scientific Technologies, Madison, USA) et comparée aux valeurs de la courbe standard d'acide gallique (0,02-0,10 mg/mL). La teneur

totale en composés phénoliques a été exprimée en milligrammes d'équivalent d'acide gallique pour 100 ml de PJ brut.

2.7. Capacité antioxydante

Avant les analyses 0,5 ml de PJ a été mélangé avec 14,5 ml de méthanol à 50% dans des tubes à centrifuger. Le mélange a été traité aux ultrasons dans de l'eau froide (10°C) et centrifugé pendant 25 min. Le surnageant d'extrait méthanolique PJ a été utilisé pour l'analyse de la capacité antioxydante.

Le test DPPH a été réalisé selon la méthode décrite par (Fawole et al., 2012). L'extrait méthanolique de PJ (15 µL) a été dilué avec 735 µL de méthanol à 100% dans des tubes suivi par l'ajout d'une solution méthanolique de DPPH (750 µL 0,1 mM).

Le mélange a été incubé pendant 30 min dans l'obscurité à la température ambiante, suivi par la mesure de l'absorbance à 517 nm en utilisant un spectrophotomètre UV-vis. La capacité de piégeage des radicaux libres du PJ basée sur la réaction DPPH a été déterminée en utilisant la courbe standard de Trolox (0–20 µM) et les résultats exprimés en équivalent millimolaire Trolox par millilitre de jus de grenade brut (mM TE/ml PJ).

2.8. Analyses statistiques

L'analyse de variance (ANOVA) a été réalisée en utilisant les procédures General Linear Models (GLM) du logiciel SigmaPlot\SPW11 (version 11, 2008, USA). Les expériences ont été effectuées en triple et les moyennes des trois ensembles de données sont présentées. Les moyennes ont été séparées par la différence la moins significative selon les multiples plages de Duncan.

3. Résultats et discussion

3.1. Caractérisations chimiques

La figure 21 montre les propriétés chimiques des fruits de la grenade stockés aux différentes températures pendant 16 semaines. Il y avait des différences significatives ($p < 0,005$) de pH en fonction de la température et de la durée de stockage. Généralement, les valeurs du pH des fruits augmentaient avec l'augmentation du temps de stockage.

L'augmentation pourrait s'expliquer par la diminution initiale de l'acidité titrable car les deux sont inversement proportionnelles (Fawole et al., 2020). Le pH des fruits le plus bas a été remarqué au cours des deux premiers mois par contre le pH le plus élevé dans les deux derniers mois de stockage.

Des résultats similaires ont été rapportés pour les fruits de la grenade (cv. Wonderful) qui ont également signalé une augmentation du pH du jus avec un stockage à 5°C, atteignant une valeur maximale de 3,96 après 16 semaines de stockage (**Fawole et al., 2020**).

Le goût de la grenade est déterminé principalement par les TSS du jus et les rapports entre TSS et AT (**Fawole et Opara, 2013**). Dans cette étude, l'AT a diminué de façon significative ($p < 0,05$) à toutes les températures au fil du temps (figure 21). Alors que l'acidité des fruits a diminué avec la température du stockage et la durée de stockage.

Les niveaux d'AT les plus bas ont été enregistrés à 6°C après 16 semaines de stockage. Cela pourrait être dû à une perte d'humidité entraînant une concentration d'acidité du jus. Ceci est en accord avec les études précédentes sur différents cultivars de grenadiers stockés dans différentes conditions (**Fawole et al., 2020, Sayyari et al., 2016**). Les changements observés dans les niveaux d'AT sont des fortes indications du métabolisme dans le fruit pendant le stockage, car la grenade est un fruit non climatérique (**Fawole et Opara, 2013; O'Grady et al., 2014**).

En comparaison avec les valeurs à la récolte la teneur en TSS a diminué avec la durée du stockage, indépendamment des températures du stockage (figure 21). Au cours de la durée du stockage; les fruits stockés à température 6°C ont présenté une diminution marquée de la teneur en TSS et la moindre diminution est de (14,8°Brix). Nos résultats sont en accord avec (**Fawole et Opara, 2013; Fawole et al., 2020**) qui ont signalé une diminution de la teneur en TSS chez les cultivars «'Bhagwa' et cv. Wonderful» avec l'augmentation de la température et de la durée du stockage.

La perte d'humidité a été observé dans les fruits de la grenade pendant le stockage provenait principalement de l'écorce et non pas des arilles. Il n'y a donc pas eu d'augmentation du TSS en raison de la concentration. Cette observation est en accord avec l'étude de (**Fawole et Opara, 2013; Fawole et al., 2020**). Une explication possible de la diminution observée de la teneur en TSS dans cette étude pourrait résulter de la dégradation des sucres avec une période de stockage prolongée (la diminution ultérieure par la suite pourrait être due à l'utilisation des sucres dans les processus métaboliques des fruits) (**Fawole et al., 2020**).

Le goût de la grenade est déterminé principalement par le niveau de TSS du jus et le rapport entre le TSS et le AT. Le rapport TSS/AT influence la saveur des produits et il mesure l'équilibre entre les acides et les sucres dans les produits (**Fawole et al., 2020**).

L'augmentation du rapport TSS/AT pourrait être due à la diminution observée d'AT pendant le stockage, ce qui se traduit par un rapport TSS/AT plus élevé (figure 21). **Arendse, (2018)**; a également signalé une augmentation de la valeur TSS/AT pendant le stockage des fruits de la grenade (cv. Wonderful) aux différentes températures (5, 7 et 10°C). De même, **Fawole et**

Opara, (2013); ont observé une augmentation significative des ratios TSS/AT des grenades 'Bhagwa' et 'Ruby' stockées pendant 16 semaines à 5, 7 et 10°C.

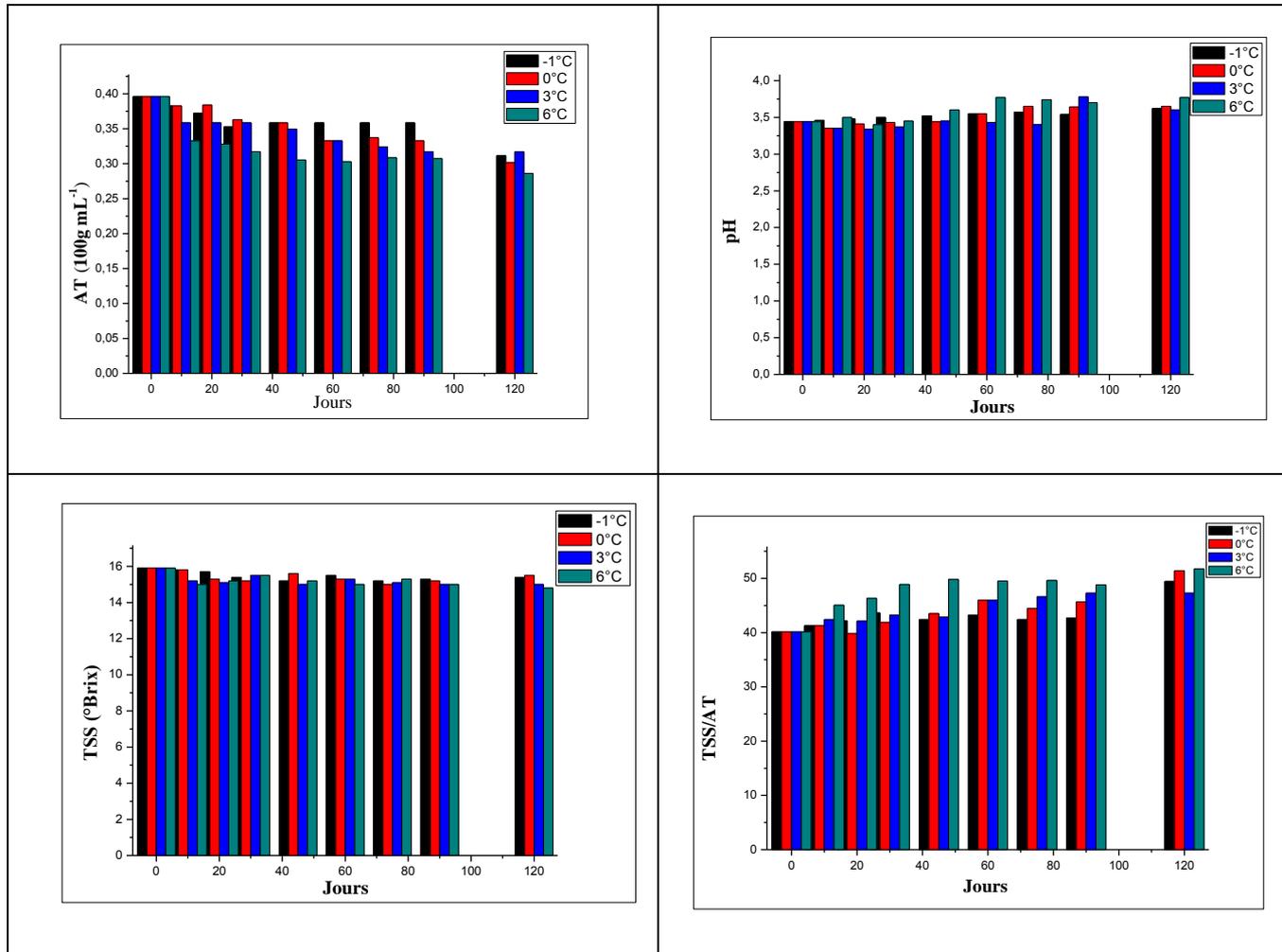


Figure 21: Propriétés chimiques pendant 16 semaines du stockage à -1, 0, 3 et 6°C.

3.2. Couleur

L'effet de la température et de la durée de stockage sur les paramètres chrominance CIE L*, a* et b* sont présentés dans la figure 22. La température de stockage a affecté les attributs de la couleur individuels des fruits de la même manière.

Les attributs de la couleur (a*) ont augmenté avec l'augmentation de la température pendant les 4 mois par rapport au témoin.

Les attributs de la couleur étaient généralement stables à 0°C pour tous les fruits. Cette observation est conforme au rapport de (O'Grady *et al.*, 2014, Fawole *et al.*, 2020). Ils n'ont observé aucun changement de la couleur dans les arilles de la grenade stockés à 0 et à 1°C.

Les attributs de la couleur étaient particulièrement plus élevés dans les fruits stockés à 6°C (figure 20). Des études ont montré qu'un stockage à température plus élevée à 8°C provoquait un brunissement accru et une pigmentation réduite (O'Grady *et al.*, 2014).

L'augmentation de la rougeur de l'arille est associée à la biosynthèse des anthocyanes qui a été signalée pendant l'entreposage au froid des fruits de la grenade (Fawole *et al.*, 2020).

Selon Nuncio-Jáuregui *et al.*, (2014) et O'Grady *et al.*, (2014); la valeur totale de la différence de la couleur (ΔE^*) de 3 dans le vin rouge est visible à l'œil humain. En utilisant ce critère, une valeur de différence de la couleur totale supérieure à 3 a été observée pour tous les échantillons sur toute la période de stockage (figure 20).

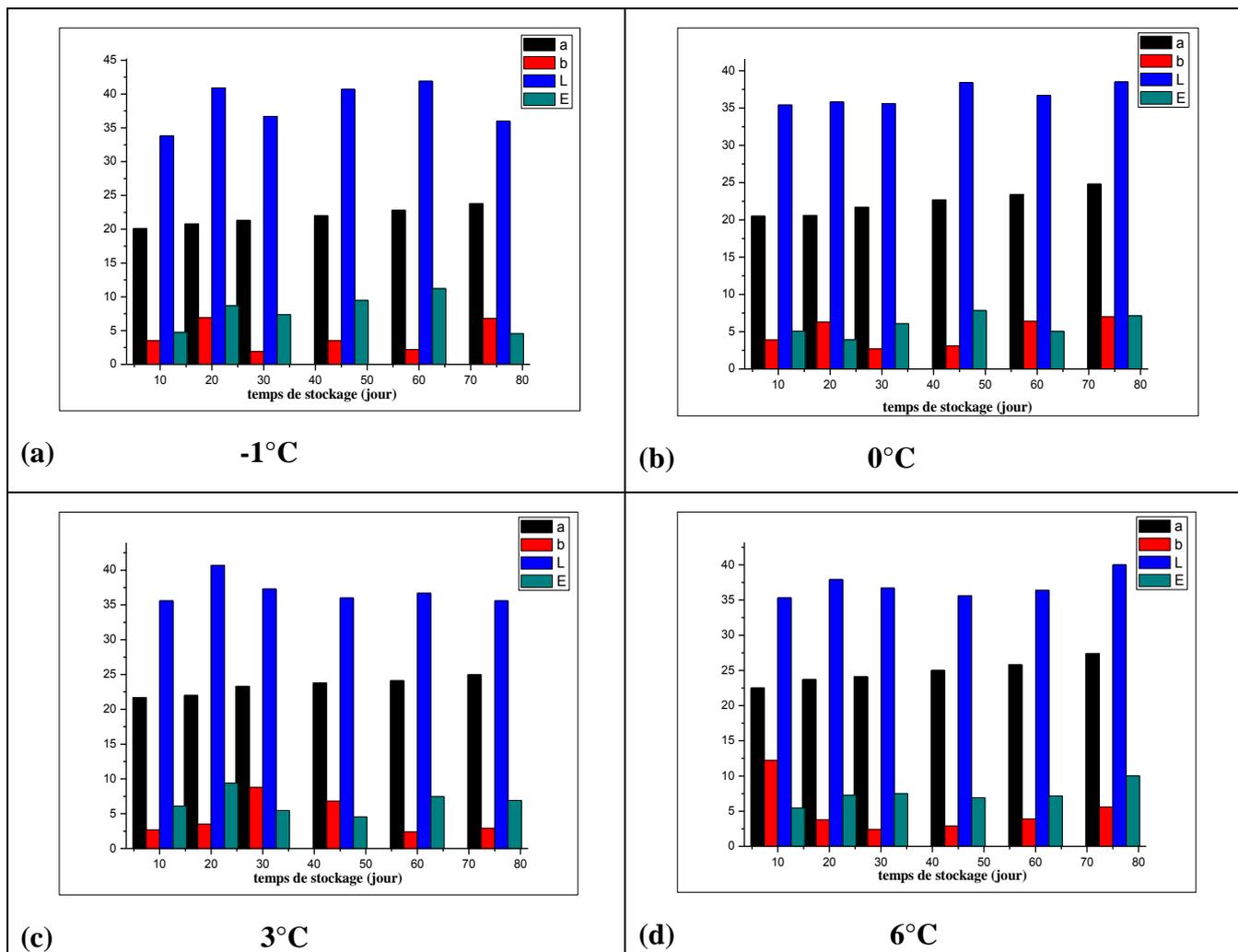


Figure 22: Changement de la couleur totale pendant les 4 mois de stockage aux différentes températures.

3.3. Composants bioactifs sélectionnés

3.3.1. Teneur en anthocyanes (TAC)

La cyanidine, la plargonidine et la delphinidine sont les principales anthocyanes du jus de la grenade et ont formé sa couleur et procurent des effets bénéfiques pour la santé humaine

(Koushesh et al., 2017; Laribi et al., 2013). Les anthocyanes sont très instables et très sensibles à la dégradation. Leur stabilité est affectée par plusieurs facteurs tels que le pH, la température du stockage, la structure chimique, la concentration, la lumière, l'oxygène et la présence d'enzymes (Castañeda-Ovando et al., 2009).

Des changements dans les TAC ont été enregistrés dans les fruits pendant la période du stockage au froid (figure 23a). Les résultats ont montré que la TAC augmentait considérablement dans les fruits pendant les 40 premiers jours, mais diminuait ensuite jusqu'à la fin du stockage. La teneur en anthocyanes a diminué progressivement dans tous les échantillons au cours de la durée du stockage. La baisse du TAC pourrait être liée à son oxydation (Koushesh et Amini, 2017). La concentration en anthocyanes peut augmenter après la récolte pendant l'entreposage au froid dans la grenade (Varasteh et al., 2012). L'augmentation du TAC pendant la première date de stockage peut être liée à la synthèse d'anthocyanes dans les fruits de la grenade pendant le stockage (Miguel et al., 2004; Varasteh et al., 2012). L'augmentation de la concentration des anthocyanes après la récolte a déjà été signalée dans les grenades, les cerises et la fraise (Meighani et al., 2015).

La concentration d'anthocyanine était stable dans les fruits pendant le premier mois. Il n'y a eu aucun effet de la température sur la concentration en anthocyanes dans la première période. Ceci est en accord avec les conclusions de (Belay et al., 2017; Meighani et al., 2015; Varasteh et al., 2012; Carmona et al., 2017), où la teneur en anthocyanes a diminué avec l'augmentation du temps de stockage, après une augmentation dans la première période.

3.3.2. Concentrations totales en polyphénols (TP)

La concentration totale en polyphénols des fruits de la grenade stockés aux différentes températures (-1, 0, 3 et 6°C) a été résumée dans la figure 23b. La teneur en polyphénols a légèrement diminuée dans toute la période de stockage à froid, puis est restée relativement constante jusqu'à la fin du stockage à froid. La teneur en TP a été influencée par le temps et la température de stockage.

Au moment de la récolte, les arilles présentaient une teneur élevée en TP de 670,55 GAE mg/100mL qui diminuait considérablement pendant le stockage au froid. Le taux de diminution était plus élevé dans les arilles stockés à 6°C. À la fin du stockage de 16 semaines, la teneur en polyphénols est de 251.12, 250.70, 263.27 et 223.08, mg GAE/100mL dans les fruits stockés à -1, 0, 3 et 6°C respectivement. La réduction du TP dans les arilles de la grenade pourrait être liée à l'oxydation des composés phénoliques (Koushesh et Amini, 2017).

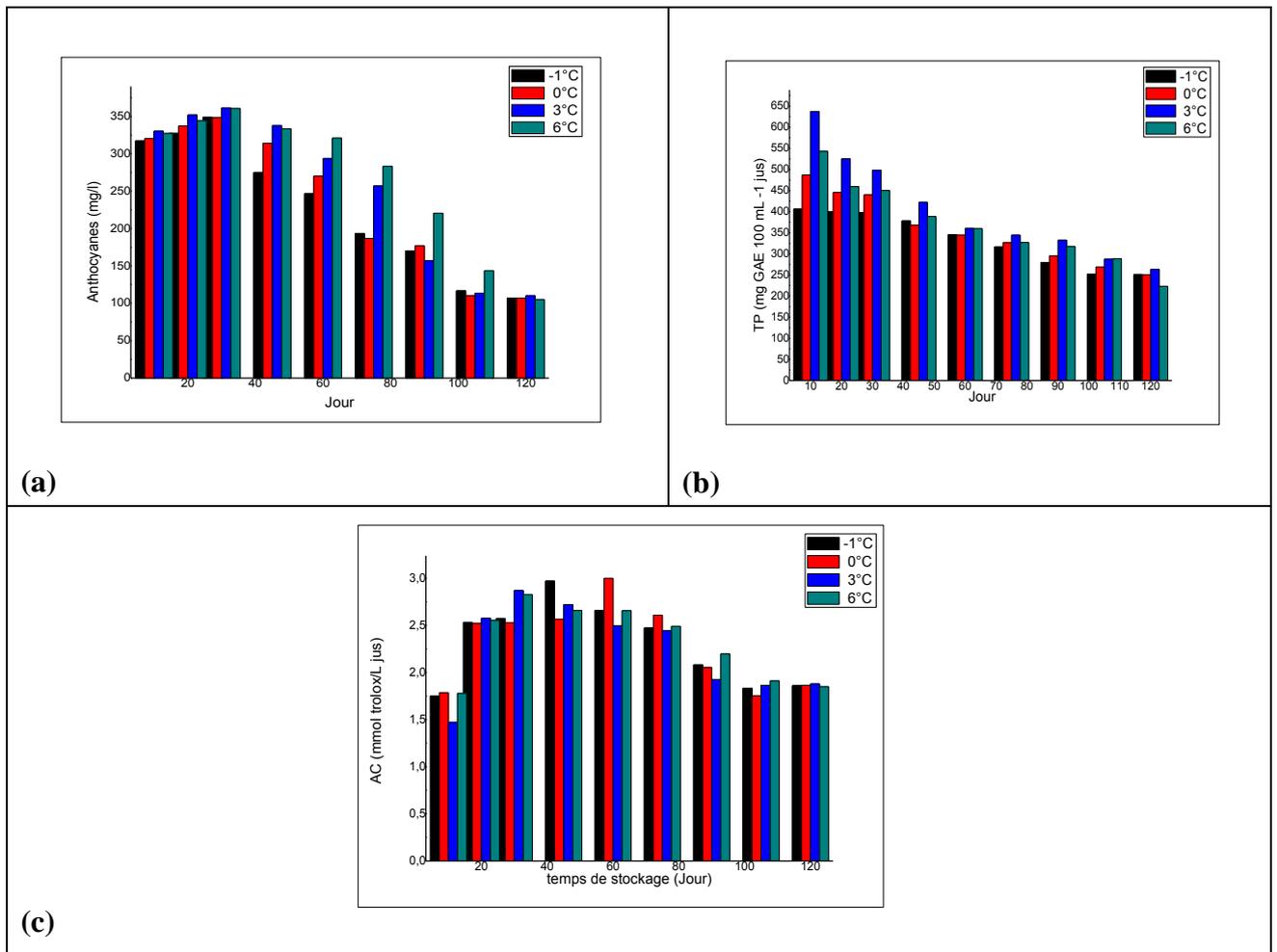


Figure 23: Analyse des composants bioactifs des arilles de la grenade pendant 4 mois de stockage aux différentes températures: a) teneur en anthocyane, b) variation des concentrations totales en polyphénols et c) variation de la capacité antioxydante.

Nos résultats sont en accord avec ceux rapportés par **Fawole et Opara, (2013)** ; qui ont signalé une baisse du TP dans les fruits de la grenade ('Ruby' et 'Bhagwa') stockés à 5–7°C pendant 16 semaines.

3.3.2. Activité antioxydante

La grenade présente une bonne capacité antioxydante principalement en raison de ses niveaux élevés des concentrations phénoliques totales, y compris les flavonoïdes, les anthocyanes et d'autres composés polyphénols (**Kulkarni et Aradhya, 2005; Ayhan et Eştürk, 2009**).

Par rapport à la récolte, l'activité d'élimination des radicaux (dans le test DPPH) a augmenté à toutes les températures de stockage après 6 semaines (Figure 23c). Par la suite, les capacités antioxydantes ont diminué progressivement à la plupart des températures du stockage.

L'activité d'élimination des radicaux diminue avec l'augmentation de la température du stockage. Les composants phénoliques individuels tels que les dérivés de l'acide ellagique et

les tanins hydrolysables ainsi que les anthocyanes ont été impliqués dans la capacité antioxydante des fruits de la grenade (Gil *et al.*, 2000; Shwartz *et al.*, 2009).

Fait intéressant, les changements observés dans les anthocyanes totaux coïncident avec les tendances observées dans la capacité antioxydante présentée par le fruit pendant le stockage, ce qui suggère que les anthocyanes pourraient jouer un rôle majeur dans la capacité antioxydante.

Les fruits de la grenade stockés à -1 et 0 avaient une activité significativement plus élevée ($P < 0,05$) par rapport aux fruits stockés à 3 et 6 à la fin de l'entreposage au froid. Il est difficile de faire une comparaison directe entre les concentrations phytochimiques trouvées dans notre expérience et celles rapportées par d'autres auteurs, car la plupart des articles publiés utilisent différentes conditions d'extraction. De plus, les conditions de croissance (type de sol, exposition au soleil et taux d'humidité) peuvent affecter de manière significative la synthèse des composés phytochimiques dans les fruits (Piljac-Žegarac et Šamec, 2011).

(Reque *et al.*, 2014) dans une étude de divers fruits, ont trouvé une oscillation similaire dans l'activité antioxydante du jus de myrtille.

4. Conclusions

Les fruits cueillis pour cette étude sont largement cultivés à travers le monde, disponibles dans la plupart des supermarchés et sont principalement considérés comme des produits à courte durée de conservation.

Les fruits de la grenade présentaient une bonne stabilité en ce qui concerne leur capacité antioxydante pendant le stockage au froid, sous réfrigération pendant des périodes plus courtes, avec peu de perte de leurs propriétés antioxydantes. En revanche, il y a eu des pertes d'anthocyanes, probablement dues à des réactions d'oxydation.

Les résultats de cette étude indiquent que la qualité nutritionnelle des fruits reste stable à une durée de conservation prolongée qui, dans certains cas, dépasse même quatre semaines. En ce qui concerne les effets de la température; le stockage à la température basse a préservé la qualité des fruits analysés pendant une période du temps prolongée par rapport au stockage à la température élevée

Il est difficile de faire une comparaison directe entre les températures du stockage au froid. Cependant, des études supplémentaires sont nécessaires afin d'optimiser le temps et la température du stockage de ces fruits, ainsi que d'identifier les composés formés par le phénomène de co-pigmentation, car ce sont probablement des composés à forte activité antioxydante.

Chapitre 3:

Séchage des arilles de la grenade

Étude comparative de deux techniques de séchage (infrarouge et convectif) des arilles de la grenade

Résumé

Le but de cette étude est une comparaison deux techniques de séchage (convective et infrarouge) des arilles de la grenade. Les températures de séchage du traitement étaient de 50, 60 et 70°C. Le temps minimum requis pour sécher les arilles de la grenade à partir d'une teneur en humidité initiale de 354,54±0,2% (db), est de 510 et 94 min pour le séchage par convection et par infrarouge, respectivement. Pour les deux processus de séchage, la teneur en humidité finale des arilles de la grenade était de 9±0,2% (wb).

La diffusivité effective des arilles a été calculée sur la base de l'équation de diffusion de la deuxième loi de Fick. Pour toutes les températures traitées, les valeurs de D_{eff} sont comprises entre $2,56 \times 10^{-10}$ à $4,75 \times 10^{-10}$ m²/s et $0,87 \times 10^{-9}$ à $2,64 \times 10^{-9}$ m²/s pour les échantillons séchés par convection et par infrarouge respectivement.

La température optimale du séchage par infrarouge est de 50°C car le produit transformé a la plus forte teneur totale en polyphénols (205±0,89 mg/100g). De plus, le produit final a également une couleur rouge grenat de haute intensité et une bonne capacité de la réhydratation. Différents modèles cinétiques de séchage ont été développés pour déminer le modèle qui représente le mieux les résultats obtenus dans ce travail.

Mots clés: Grenade, Séchage infrarouge, Convectif.

1. Introduction

La grenade est l'une des plantes les plus importantes d'Algérie, poussant dans les régions arides et semi-arides en raison de sa capacité à s'adapter à des conditions écologiques défavorables. Le fruit de la grenade est consommé frais ou il peut être transformé en jus, sirop, confiture ou dans les industries alimentaires comme ingrédient dans la préparation d'autres aliments. C'est l'un des produits les plus riches en antioxydants, car il contient des polyphénols, des tanins (punicalagin et punicalin) et des anthocyanes (Arendse et al., 2016; Alcaraz-Mármol et al., 2017; Diamanti et al., 2017). Ces derniers préviennent les maladies chroniques telles que les maladies cardiovasculaires, le diabète de type 2, le cancer, les maladies neurodégénératives et l'inflammation (Hasnaoui, 2014; Zarfeshany, 2014; Diamanti et al., 2017; Cano-Lamadrid et al., 2017).

La partie comestible du fruit de la grenade se compose de 40% d'arilles et de 10% de graines. Les arilles contiennent 85% d'eau, 10% de sucres totaux; principalement du fructose et du glucose et 1,5% de pectine, de l'acide organique tel que l'acide ascorbique, l'acide citrique et l'acide malique et certains composés bioactifs (Tezcan et al., 2009; Viuda-Martos et al., 2010). Cependant, la durée de conservation de la grenade à la température ambiante ne dépasse pas 12 à 14 jours (Dak et al., 2014). Par conséquent, pour augmenter la durée de conservation, un traitement de séchage est nécessaire.

Le séchage est un processus traditionnel utilisé pour préserver et prolonger la durée de conservation de divers produits alimentaires. Le processus consiste à éliminer l'eau

des aliments, empêchant ainsi la détérioration des aliments et la prolifération des micro-organismes (**Mphahlele, 2016**).

Généralement, la technique de séchage par convection reste la méthode la plus utilisée pour réduire la teneur en eau des fruits et des légumes, car elle est rentable. Cependant, l'inconvénient de cette technologie est principalement la dégradation de la qualité (macromolécules, vitamines et couleur) en raison du temps de séchage plus long (**Mphahlele, 2016; Dak, 2014**). Par conséquent, l'exploitation des technologies innovantes telles que l'infrarouge (IR) est particulièrement intéressante.

Le séchage infrarouge a été prouvé par plusieurs études comme une méthode efficace pour déshydrater les aliments (**Venkitasamy et al., 2017**). Il est basé sur le rayonnement IR, l'énergie du rayonnement est transférée au produit sans chauffer l'air ambiant. Le mode de chauffage de la méthode permet un transfert d'énergie direct et élevé vers le produit par rapport aux modes de séchage conventionnels tels que le transfert de chaleur par convection (**Glouannec et al., 2002; Chen et al., 2017**).

La méthode de séchage IR est particulièrement efficace pour les produits à forte teneur en eau. Des études antérieures ont montré que ce mode de séchage a amélioré la vitesse de séchage et a donné de meilleures textures, saveurs et couleur des produits séchés par rapport à d'autres méthodes conventionnelles (**Özdemir et al., 2017; Venkitasamy et al., 2018, Onwude et al., 2018**).

La modélisation mathématique est une approche appropriée pour décrire la cinétique du processus de séchage. Les modèles d'équation peuvent être classés en modèles théoriques, semi-théoriques et empiriques (**Younis et al., 2018**). Les modèles semi-théoriques sont encore utilisés et représentent un bon outil pour modéliser la cinétique du séchage des fruits. Ils sont dérivés des solutions générales de la deuxième loi de diffusion de Fick. Certains modèles couramment utilisés sont des modèles Page, Handerson et Pabis, Lewis, Two term, Approximation of diffusion et Midilli et al.,.

Les modèles empiriques dérivent d'une relation directe entre la teneur moyenne en humidité et le temps de séchage (**Onwude et al., 2016; Castro, Mayorga et Moreno, 2018; Behera et Sutar, 2018**).

Récemment, des nombreuses recherches ont été menées sur la modélisation mathématique des caractéristiques du séchage de divers légumes et fruits, tels que les tranches de cocoyam (**Adeyanju, 2015**), la patate douce (**Onwude et al., 2018**), les tranches d'ail (**Younis et al., 2018**), tranches d'ingiberoffcinale (**Parlak, 2014**), uvaia (**Ramos et al., 2017**). Néanmoins, très peu d'études ont été faites sur la modélisation mathématique de la cinétique de séchage infrarouge des arilles de grenade (**Doymaz, 2012**).

L'objectif principal de cette étude est de déterminer l'influence de deux méthodes de séchage différentes (séchage convectif et séchage infrarouge) sur la composition biochimique, la couleur et la propriété de la réhydratation des arilles séchées et de modéliser la cinétique de séchage.

2. Matériels et méthodes

2.1. Produit

Les fruits frais de la grenade (*P. granatum* L. doux-acide) ont été cueillis sur des arbres matures dans la ville d'Ain Touta (Batna, Algérie) à l'automne 2017. Ils étaient à pleine maturité et avaient les caractéristiques suivantes: poids $386,53 \pm 3,55$ g, pH $3,86 \pm 0,04$ et $16 \pm 0,13^\circ$ Brix. Ils ont été conservés au réfrigérateur à $4 \pm 1^\circ\text{C}$ jusqu'au séchage, moment auquel ils ont été lavés et coupés et les arilles ont été séparés manuellement.

2.2. Méthodes de séchage

La teneur en humidité initiale des arilles (M_0) était de $78 \pm 0,2\%$ ($3,54 \pm 0,2$ kg par kg de matière sèche). Ceci a été déterminé par séchage dans une étuve à vide à 70°C pendant 24 h selon la méthode de l'Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 1990). Les échantillons pesant environ 30 g de trois répétitions ont été soumis à deux protocoles de séchage différents.

2.2.1. Séchage convectif

Le séchage par convection a été effectué au laboratoire LSA, Département de Technologie Alimentaire, Université de Batna 1; dans une armoire de séchage MEMMERT (UF750, Allemagne) comprenant un ventilateur centrifuge pour induire le flux d'air, un élément chauffant électrique, un filtre à air, un régulateur proportionnel de la température de l'air et un contrôle de la vitesse du ventilateur.

Les échantillons ont été séchés à 50, 60 et 70°C et à la vitesse d'air constante ($2,0 \pm 0,1$ m/s). La perte de poids a été mesurée à des intervalles de 10 minutes. Le séchage a été arrêté lorsque la teneur en humidité est devenue constante ($0,09 \pm 0,002$ kg par kg de matière sèche, ci-après $9 \pm 0,2\%$). Les échantillons séchés ont été refroidis à l'intérieur du dessiccateur puis emballés dans des sacs en polyéthylène pour éviter la réhydratation par l'humidité de l'air ambiant.

2.2.2. Séchage infrarouge

Le séchage par infrarouge a été effectué au laboratoire LAPAPEZA, Institut des Sciences Vétérinaires et des Sciences Agronomiques, Université de Batna 1. Le dessiccateur IR (IR 35 DENVER INSTRUMENT, Denver, Colorado) utilisé dans cette étude est présenté dans la figure

22. L'analyseur d'humidité se compose d'une unité de chauffage, d'un système de pesée et d'une unité de contrôle. Avant de sécher les échantillons, l'appareil doit être réchauffé pendant environ 10 minutes afin d'atteindre le régime stationnaire. Le séchage a également été effectué à trois températures différentes: 50, 60 et 70°C. La perte de poids de l'échantillon pendant le séchage est mesurée à des intervalles de 10 min. Le processus de séchage a été arrêté lorsque la teneur en humidité des échantillons était stable à $9 \pm 0,2\%$ (db). Enfin, comme pour le séchage convectif, les arilles de la grenade séchés sont conditionnés dans des sacs en polyéthylène après refroidissement.

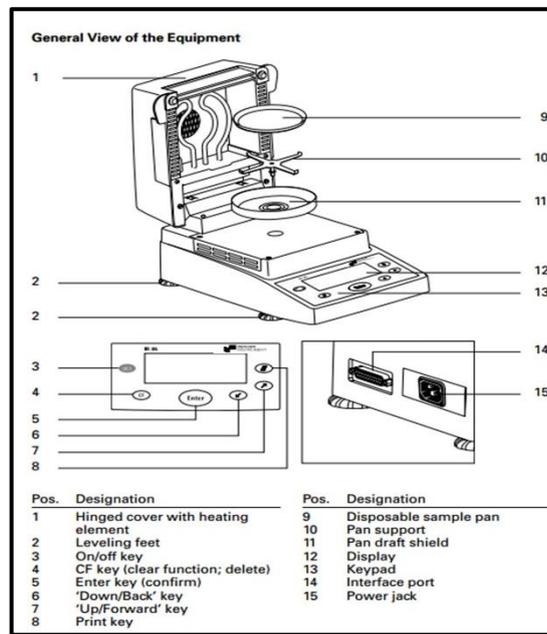


Figure 24: Appareil de séchage par infrarouge

2.3. Modélisation mathématique du séchage

2.3.1. Cinétique de séchage

Le taux d'humidité (MR) des arilles de la grenade est calculé à l'aide de l'Eq.(12):

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (12)$$

Où: M_t et M_0 sont les teneurs en humidité (kg d'eau/kg dm) au temps "t" et au temps "0", respectivement, M_e est l'humidité à l'équilibre (kg d'eau/kg dm).

Différents modèles de cinétiques de séchage ont été utilisés afin de prédire le séchage de la grenade (tableau 13). L'analyse de régression non linéaire a été réalisée à l'aide du logiciel Sigma Plot\SPW11 (version 11, 2008, USA) pour ajuster les données expérimentales des modèles d'équation sélectionnés. L'analyse statistique a été utilisée pour évaluer

l'ajustement des données expérimentales aux différents modèles où R^2 est le coefficient de détermination, (χ^2) est la réduction et (RMSE) est l'erreur quadratique moyenne. Ces paramètres ont été calculés à l'aide des équations ci-dessous:

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{ei} - MR_{pi})^2}{N - Z} \quad (13)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{ei} - MR_{pi})^2} \quad (14)$$

Où: MR_{ei} est le taux d'humidité expérimental, MR_{pi} est le taux d'humidité prévu, N est le nombre d'observations et Z est le nombre de constantes dans un modèle.

Tableau 13: Modèles mathématiques utilisés pour décrire le taux d'humidité de la courbe de séchage en couche mince.

No.	Model	Equation	Reference
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$	Bruce, (1985)
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Page, (1949)
3	Modified Page	$MR = \exp(-kt)^n$	Overhults et al., (1973)
4	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Hashim et al., (2014)
5	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	Togrul et Pehlivan, (2002)
6	Two-term	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(k_1t)$	Sacilik, (2007)
7	Two-term exponential	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	Dash et al., (1980)
8	Wang and Singh	$MR = 1 + a + bt^2$	Wang et Singh, (1978)
9	Modified Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	Zenoozian et al., (2008)
10	Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Midilli et al., (2002)
11	Demir et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + b$	Demir et al., (2007)

Le taux de séchage (DR) des arilles de la grenade a été calculé en utilisant l'Eq. (15):

$$DR = \frac{M_t - M_{t+\Delta t}}{\Delta t} \quad (15)$$

Où: $M_{t+\Delta t}$ est la teneur en humidité au temps $t + \Delta t$ et Δt est la différence entre deux temps de séchage successifs (min).

2.3.2. Détermination de la diffusivité effective de l'humidité

La diffusivité effective a été calculée sur la base de la deuxième loi de diffusion de Fick Eq. (16) selon le protocole de **Doymaz, (2011)**:

$$\frac{\delta M}{\delta t} = D_{eff} \nabla^2 M \quad (16)$$

Pour une forme sphérique et en supposant une migration d'humidité par diffusion et pour une température constante pendant le séchage, la solution analytique de cette équation est donnée par l'Eq.17:

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{L^2} t\right) \quad (17)$$

Où: D_{eff} est la diffusivité effective de l'humidité (m^2/s), t est le temps de traitement (s) et L est la demi-épaisseur des échantillons (m). Pour des périodes de séchage plus longues, l'Eq. (18) a été utilisée:

$$\ln MR = \ln \frac{6}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff}}{L^2} t \quad (18)$$

La diffusivité effective est obtenue en traçant les données expérimentales de séchage en fonction de $\ln MR$ en fonction du temps, où K est la pente de la courbe (Eq.19):

$$K = \frac{\pi^2 D_{eff}}{R^2} \quad (19)$$

2.3.3. Calcul de l'énergie d'activation

La dépendance de la diffusivité de la température d'humidité effective est décrite par l'équation d'Arrhenius (Eq. 20):

$$D_{eff} = D_0 e^{\frac{E_a}{R(T+273.15)}} \quad (20)$$

Où: D_0 est le facteur pré-exponentiel d'Arrhenius (m^2/s), E_a (kJ/mol) est l'énergie d'activation, R est la constante de gaz universelle (kJ/mol·K) et T ($^{\circ}C$) est la température de traitement.

2.4. Composition physicochimique des arilles séchés

2.4.1. Polyphénols totaux

Chaque échantillon a été réduit en poudre à l'aide d'un mortier et d'un pilon et 1,0 g a été soigneusement agité avec 2,5 ml de réactif Folin-Ciocalteu dilué 10 fois. Après 1 min, 2,0 ml d'une solution de carbonate de sodium à 7,5% (Na_2CO_3) a été ajouté. Le mélange est laissé se déposer pendant 30 minutes à la température ambiante ($25^{\circ}C$). L'absorption à 760 nm du liquide a été mesurée à l'aide d'un spectrophotomètre (SHIMADZU UV-1800). Les résultats ont été exprimés en milligrammes d'acide gallique par cent gramme du poids sec.

2.4.2. Analyse de la couleur

Les changements de la couleur pendant le séchage ont été mesurés en utilisant un colorimètre KONICA MINOLTA (CR-10, Japon). La couleur a été déterminée en fonction des paramètres L^* , a^* et b^* . La valeur L^* est une mesure de la luminosité, allant de 0 (noir) à +100 (blanc), la valeur a^* varie de -100 (vert) à +100 (rougeur) et la valeur b^* change de -100 (bleuissement) à +100 (jaunissement).

2.4.3. Capacité de la réhydratation

La capacité de la réhydratation (absorption d'eau) (RC) a été déterminée selon la méthode d'**Horuz et Maskan, (2015)** et calculée à l'aide de l'Eq. 21:

$$RC\% = \left(\frac{W_t - W_d}{W_d} \right) \times 100 \quad (21)$$

Où: W_t et W_d sont respectivement les poids des arilles au temps "t" et au temps initial.

2.5. Analyses statistiques

L'analyse de la variance (ANOVA) a été réalisée en utilisant les procédures General Linear Models (GLM) du logiciel SigmaPlot\SPW11 (version 11, 2008, USA). Les expériences ont été effectuées en triple et les moyennes des trois ensembles de données sont présentées. Les moyennes ont été séparées par la différence la moins significative selon les multiples plages de Duncan.

3. Résultats et discussion

3.1. Comportement des arilles de la grenade au séchage

3.1.1. Taux d'humidité et taux de séchage

Les profils de la teneur en humidité des arilles de la grenade dans le temps pour les deux types de séchage; séchage infrarouge et le séchage convectif sont présentés dans la figure 25. La teneur en humidité est inversement proportionnelle à la température du séchage et diminue de façon exponentielle avec le temps.

La diminution du taux d'humidité (MR) est plus rapide que l'augmentation de l'énergie thermique, ce qui augmente l'activité des molécules d'eau et donc la diffusivité de l'humidité (**Doymaz, 2011; Chen et al., 2017**).

Les courbes montrent que la perte d'eau est presque linéaire pendant au moins la première moitié du processus de séchage par IR. Dans le cas du séchage convectif, les données supplémentaires suggèrent un bref retard dans la perte d'eau au début, ce qui est attendu car la température de séchage n'a pas encore atteint la température d'équilibre humide. Une fois cet équilibre atteint, la perte d'eau progresse linéairement à mesure que le liquide est transporté à la surface du produit par les forces capillaires où il s'évapore (**Hammouda et Mihoubi, 2014**).

Avec un chauffage par convection, les temps requis pour sécher les arilles de la grenade d'une teneur en humidité initiale de $78 \pm 0,2\%$ à une teneur finale de $9 \pm 1\%$ étaient respectivement de 780, 660 et 510 min à 50, 60 et 70°C. Avec le chauffage infrarouge, ces

temps étaient respectivement de 260, 132 et 94 min, c'est-à-dire considérablement plus courts. Non seulement le séchage par chauffage infrarouge était presque trois fois plus rapide à 70°C qu'à 50°C, mais il était trois fois plus rapide que le séchage par convection par rapport à 50°C, cinq fois plus rapide à 60°C et plus de cinq fois plus rapide à 70°C.

Plusieurs auteurs ont signalé des augmentations similaires du taux de séchage des produits végétaux à mesure que la température augmente, quelle que soit la méthode utilisée (**Toğrul, 2006; Doymaz, 2011; Aral et al., 2016; Ramos et al., 2017**). Il est possible qu'en fournissant plus d'énergie au produit à sécher, le séchage infrarouge accélère à la fois le transfert de chaleur et le transfert de masse par rapport au séchage par convection. En d'autres termes, l'augmentation de l'intensité de la source infrarouge a augmenté la température de l'échantillon entier plus rapidement, augmentant ainsi à la fois la pression de la vapeur d'eau à la surface et la diffusion d'humidité à l'intérieur du matériau.

Le rayonnement infrarouge peut également interagir avec des composants chimiques autres que l'eau, augmentant encore la température du produit et donc la mobilité de l'humidité interne (**Aghbashlo, 2016; Chen et al., 2017**). Il faut donc s'attendre à ce que la technologie de séchage IR fournisse une efficacité de séchage plus élevée par rapport au séchage convectif.

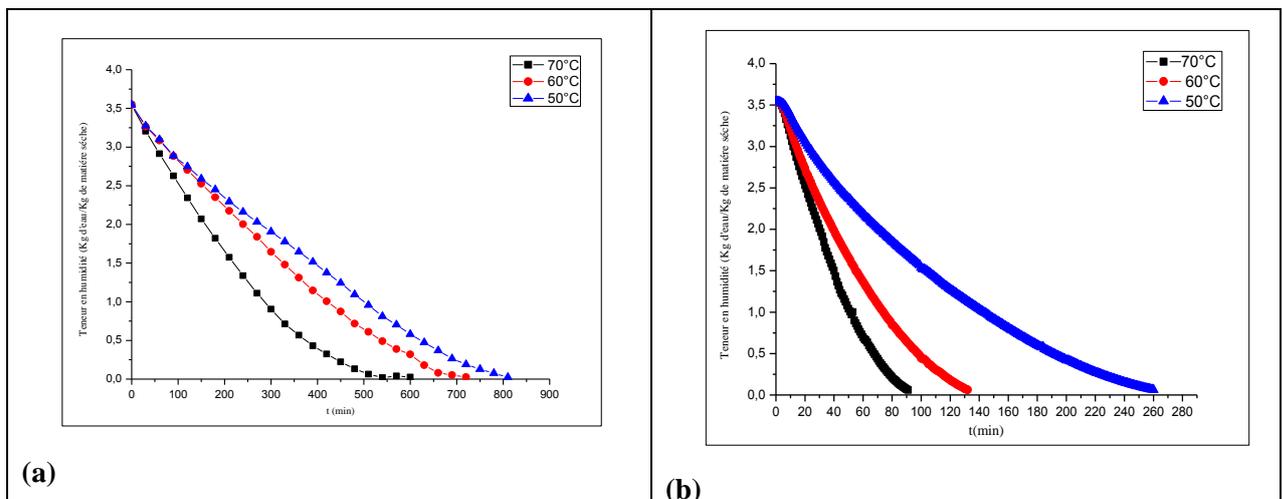


Figure 25: Séchage des arilles de la grenade aux différentes températures:
a) par chauffage convectif et b) par chauffage infrarouge.

Le taux de séchage des arilles de la grenade en fonction de la teneur en humidité est illustré à la figure 26. Pour le chauffage à la fois convectif et infrarouge, le taux de séchage diminue avec la diminution de la teneur en humidité, commençant rapidement pendant la période initiale et devenant très lent vers la fin du processus.

Les vitesses de séchage initiales et finales moyennes pour 50, 60 et 70°C étaient respectivement de 0,009 et 0,011 pour la convection et de 0,033 et 0,071 pour le séchage par infrarouge (en kg d'eau/kg de matière sèche/min). À toutes les températures, le séchage est plus

rapide pendant la période initiale quelle que soit la méthode. Il est connu qu'à mesure que la teneur en humidité approche de l'équilibre, les taux de séchage ralentissent (**Parlak, 2014**). De plus, le taux de séchage des arilles de la grenade ne semble jamais être très constant. Cela a été observé précédemment avec des arilles de la grenade et d'autres produits végétaux séchés par des méthodes convectives (**Parlak, 2014; Chen et al., 2015**).

Enfin, on note qu'à 70°C, la vitesse de séchage IR est sept fois plus rapide que la vitesse de séchage convectif.

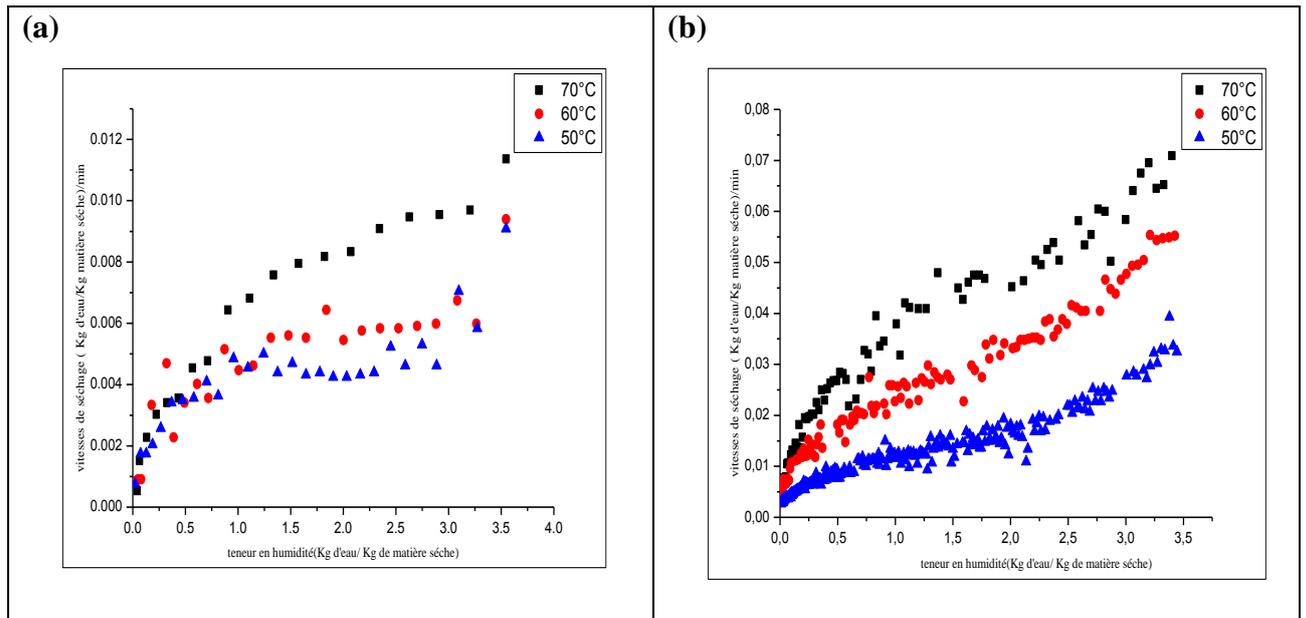


Figure 26: Taux de séchage des arilles de grenade aux différentes températures:
a) par chauffage convectif et b) par chauffage infrarouge.

3.1.2 Évaluation des modèles de séchage

Les données de séchage des arilles de la grenade ont été converties en teneur en humidité (MR) et adaptées à six modèles semi-empiriques. Les valeurs des paramètres du modèle ont été déterminées en utilisant une régression non linéaire. Le tableau 14 répertorie tous les modèles par nom, équation et référence. Les tableaux 14 et 15 montrent respectivement pour le séchage infrarouge et le séchage convectif la qualité de l'ajustement de chacun des six modèles préférés en termes de coefficient de détermination (R^2), de chi carré (χ^2) et d'erreur quadratique moyenne (RMSE).

Tableau 14: Qualité d'ajustement des modèles pour le séchage infrarouge aux différentes températures.

Model	Coefficient	50°C	60°C	70°C
MR = exp(-kt)	R ²	0.9740	0.9840	0.9898
	χ^2	0.005103825	0.002837114	0.00164662
	RMSE	0.071047443	0.053062426	0.040500455
MR = a exp(-kt)	R ²	0.9866	0.9912	0.9931
	χ^2	0.002674054	0.001575388	0.001124618
	RMSE	0.051139843	0.039389325	0.033406092
MR = a exp(-ktⁿ) + bt	R ²	0.9987	0.9998	0.9998
	χ^2	0.000263226	4.6106E-05	3.39937E-05
	RMSE	0.015954572	0.006712532	0.00579668
MR = a exp(-kot) + b exp(k1t)	R ²	0.9866	0.9912	0.9998
	χ^2	0.002735494	0.001599976	3.41265E-05
	RMSE	0.051139537	0.039388981	0.00579668
MR = a exp(-kt) + b exp(-gt) + c exp(-ht)	R ²	0.988	0.9918	0.9998
	χ^2	0.002513891	0.001523804	3.43952E-05
	RMSE	0.04845761	0.038138435	0.00579668
MR = 1 + at + bt²	R ²	0.9994	0.9998	0.9993
	X ²	0.000132967	4.19642E-05	0.000121847
	RMSE	0.011339457	0.006403942	0.010974559

Tableau 15: Qualité d'ajustement des modèles pour le séchage par convection aux différentes températures.

MR = exp(-kt)	R ²	0.9771	0.9775	0.9835
	χ^2	0.00402185	0.00424998	0.00329894
	RMSE	0.06223253	0.06381924	0.05581815
MR = a exp(-kt)	R ²	0.98	0.9818	0.9873
	χ^2	0.00364829	0.00357926	0.00270846
	RMSE	0.05812094	0.05727992	0.04906652
MR = a exp(-ktⁿ) + bt	R ²	0.9993	0.9995	0.9993
	χ^2	0.00017725	0.00014859	0.00017064
	RMSE	0.01255214	0.01140243	0.01192466
MR = a exp(-kot) + b exp(k1t)	R ²	0.9811	0.9838	0.9901
	χ^2	0.0037722	0.00350582	0.00240237
	RMSE	0.05668649	0.05405106	0.04322625

Chapitre 3:		Séchage des arilles de la grenade		
MR = a exp(-kt) + b exp(-gt) + c exp(-ht)	R ²	0.9811	0.9838	0.9901
	χ^2	0.00394367	0.00389516	0.00280276
	RMSE	0.05668649	0.05404972	0.04322625
MR = 1 + at + bt²	R ²	0.9993	0.9997	0.9998
	X ²	0.00031929	0.00049019	0.00023759
	RMSE	0.01684665	0.02071021	0.01407101

Pour les deux types de séchage, les valeurs R² étaient d'au moins 0,97 tandis que les valeurs χ^2 et RMSE étaient respectivement inférieures à $2,7 \times 10^{-3}$ et 0,0710 pour le séchage infrarouge et inférieures à $4,2 \times 10^{-3}$ et 0,06 respectivement pour le séchage convectif.

Le modèle qui correspondait le mieux aux données de séchage était le modèle logistique modifié de Midilli et *al.*, Pour lequel les valeurs R², χ^2 et RMSE variaient respectivement de 0,998 à 0,999, $4,6 \times 10^{-5}$ à $2,6 \times 10^{-4}$ et 0,01 à 0,005 pour le séchage infrarouge et 0,977 à 0,999, 1×10^{-4} à 4×10^{-3} et 0,04 à 0,06 pour le séchage convectif. En plus de prédire de manière satisfaisante les caractéristiques de séchage des arilles de grenade, ce modèle a fonctionné de manière similaire avec d'autres cultures agricoles et sous-produits, tels que le nom d'au moins deux (Doymas, 2011; Babua et *al.*, 2018).

3.1.3. Diffusivité efficace de l'humidité

Les valeurs de diffusivité d'humidité effective (D_{eff}) calculées en utilisant l'Eq. (18) variaient de $2,56 \times 10^{-10}$ à $4,75 \times 10^{-10}$ m²/s pour les échantillons séchés par convection. Pour l'IR, la plage était de $0,87 \times 10^{-9}$ à $2,64 \times 10^{-9}$ m²/s. Les coefficients de détermination pour les deux méthodes étaient supérieurs à 0,99 (figure 27). Les valeurs de D_{eff} obtenues dans cette étude se situent dans la plage générale de 10^{-12} à 10^{-8} m²/s du séchage des matières alimentaires (Doymaz, 2012; Zielinska, 2016).

La température et la méthode de séchage ont eu un effet significatif sur la valeur de D_{eff} . En plus; avec l'augmentation de la température, le rayonnement infrarouge fait augmenter l'énergie moléculaire en termes d'états vibratoires, rotationnels et électroniques des atomes. Ces états énergétiques accrus, transmises aux molécules d'eau, augmentent, encore, la température de l'échantillon et la pression de la vapeur et par conséquent la diffusion de l'humidité augmente vers la surface de l'échantillon (Onwude et *al.*, 2018). Il a été démontré que D_{eff} augmente à mesure que la température augmente (Yilmaz et *al.*, 2015; Chenand *al.*, 2017; Castro, 2018). Cela est probablement dû à l'effet de la température sur le transfert de masse et donc à une diffusion plus rapide de l'humidité dans l'échantillon (Ghasemi et Chayjan, 2018). Les résultats obtenus dans la présente étude corroborent ceux rapportés précédemment pour

le séchage du grignons d'olive, des bleuets et des graines de grenade (Doymaz, 2012; Zielinska, 2016).

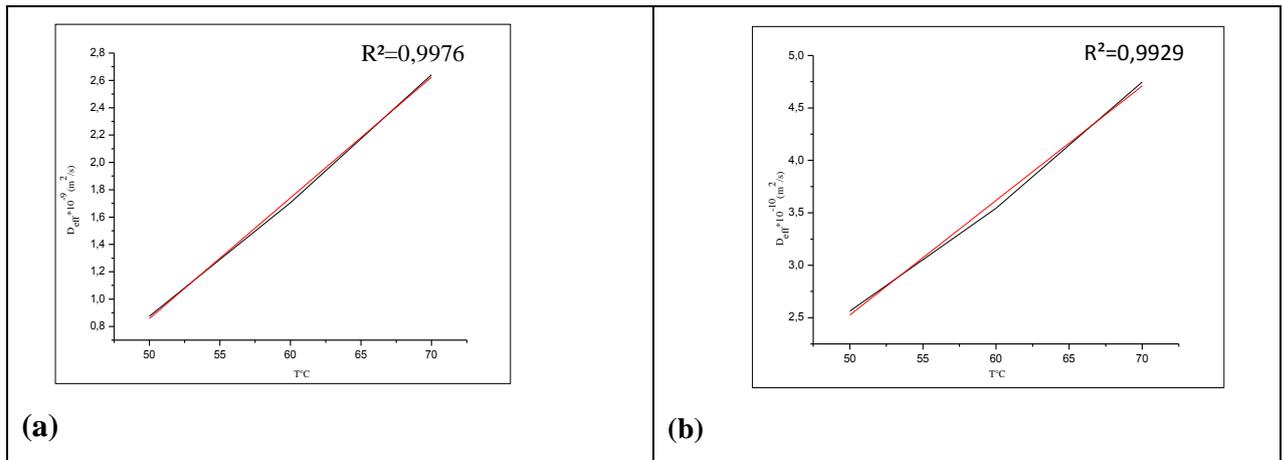


Figure 27: Diffusivité efficace en fonction de la température:
a) séchage par convection et b) séchage par infrarouge.

3.1.4. Énergie d'activation

L'énergie d'activation (E_a) est déterminée à partir de l'équation d'Arrhenius (Eq. 20). Les valeurs calculées pour le séchage convectif et le séchage infrarouge des arilles de la grenade sont respectivement de 45,92 kJ/mol et de 25,63 kJ/mol. Ces derniers se situent dans la gamme de 12,7 à 110 kJ/mol rapportée pour divers aliments (Doymaz, 2011a). La valeur (E_a) du séchage convectif obtenue dans cette étude est inférieure à ce qu'a été rapporté précédemment (60,34 kJ/mol) par (Doymas, 2011a). C'est peut-être en raison de l'appareil utilisé pour sécher le produit; un appareil à l'échelle pilote. Cependant, dans une étude similaire utilisant un appareil de laboratoire à 55°C, 65°C et 75°C, le même auteur a obtenu une (E_a) de 49,7 kJ/mol (Doymaz, 2011b).

Les études sur le séchage infrarouge des arilles de grenade sont très rares. En travaillant avec des tranches de carotte, Toğrul (2005) a rapporté une énergie d'activation assez similaire à celle que nous avons obtenue (22,43 kJ/mol).

Dans le cas des arilles de la grenade, le séchage IR a une énergie d'activation inférieure à celle du séchage par convection. Cela pourrait être dû au flux d'air autour du matériau de séchage lors du séchage par convection. De plus, l'IR est appliqué directement sur la surface de l'échantillon sans chauffer l'air environnant ni créer de courants d'air. L'échantillon absorbe ainsi directement l'énergie électromagnétique. L'énergie absorbée provoque des vibrations moléculaires, analogues à l'oscillation des molécules d'eau supposées se produire lors du chauffage par micro-ondes. L'humidité à l'intérieur du matériau est ainsi rapidement chauffée et vaporisée.

Étant donné qu'aucune énergie n'est gaspillée pour chauffer l'air qui n'entre pas en contact avec le produit, le séchage infrarouge semble être plus économe en énergie que le séchage convectif. Cela fait de l'IR une source attrayante d'énergie thermique à la fois pour raccourcir le temps de séchage et pour réduire la consommation d'énergie (**Łechtańska et al., 2015; Brandão et al., 2016; Onwude et al., 2018**).

3.2. Composition physicochimique des arilles de la grenade séchés

3.2.1. Polyphénols totaux

La préservation de la valeur nutritive est une considération majeure lors de la déshydratation des fruits. Tant l'activité antioxydante que les caractéristiques sensorielles importantes du produit final dépendent de la préservation des composés polyphénoliques (**Nowicka et al., 2015**). La figure 28 montre la teneur totale en polyphénols des arilles de la grenade séchés en fonction de la température de traitement pour les deux méthodes de séchage.

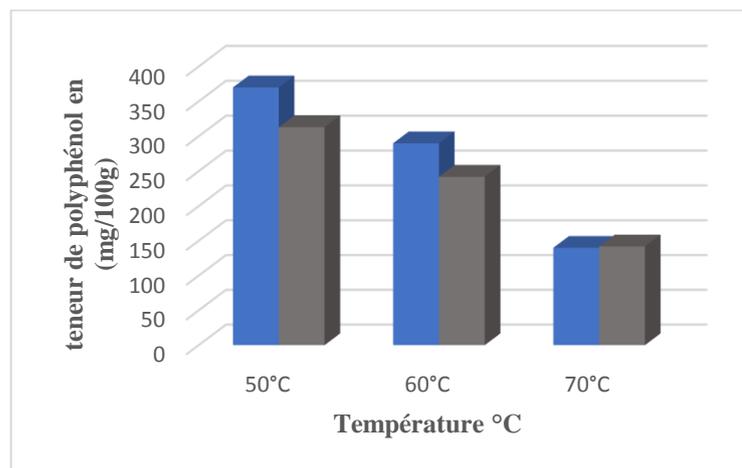


Figure 28: Teneur totale en polyphénols des arilles de la grenade séchés par chauffage (IR) et par (CD).

Les propriétés physico-chimiques et la structure chimique des composés phénoliques peuvent être affectées par la méthode de séchage ainsi que la température et le temps de traitement (**Galaz et al., 2017**).

À 50°C et 60°C, la teneur en polyphénols est restée plus élevée dans les arilles séchés par infrarouge par rapport à celles séchés par convection (Figure 28). À 70°C, la teneur en polyphénols a chuté presque de la même quantité quelle que soit la source de chaleur. Cela prouve que la température du séchage a un impact majeur sur les polyphénols (**Mphahlele, 2016**). **Adak et al., (2017)**; ont montré que le chauffage IR est un moyen efficace d'améliorer la stabilité physico-chimique des produits végétaux séchés. La polymérisation et les oxydations chimiques semblent être largement responsables de ces pertes (**Galaz et al., 2017**).

Des réactions enzymatiques et d'autres réactions non enzymatiques peuvent également être impliquées (Bchir *et al.*, 2012). Dans le cas des arilles de la grenade, une meilleure qualité du produit final a été obtenue à une température de séchage de 60°C (Calín-Sánchez *et al.*, 2013).

3.2.2. Analyse de la couleur des arilles séchés

La rétention de la couleur est une mesure de la détérioration de la qualité des aliments due à tout type de traitement. Les paramètres L*, a* et b* sont largement utilisés pour quantifier les changements de la couleur lors des traitements thermiques et non thermiques des fruits et des légumes (Horuz et Maskan, 2015; Aral, 2016). La figure 29 montre leur variation dans les arilles de la grenade lors du séchage par convection et par infrarouge.

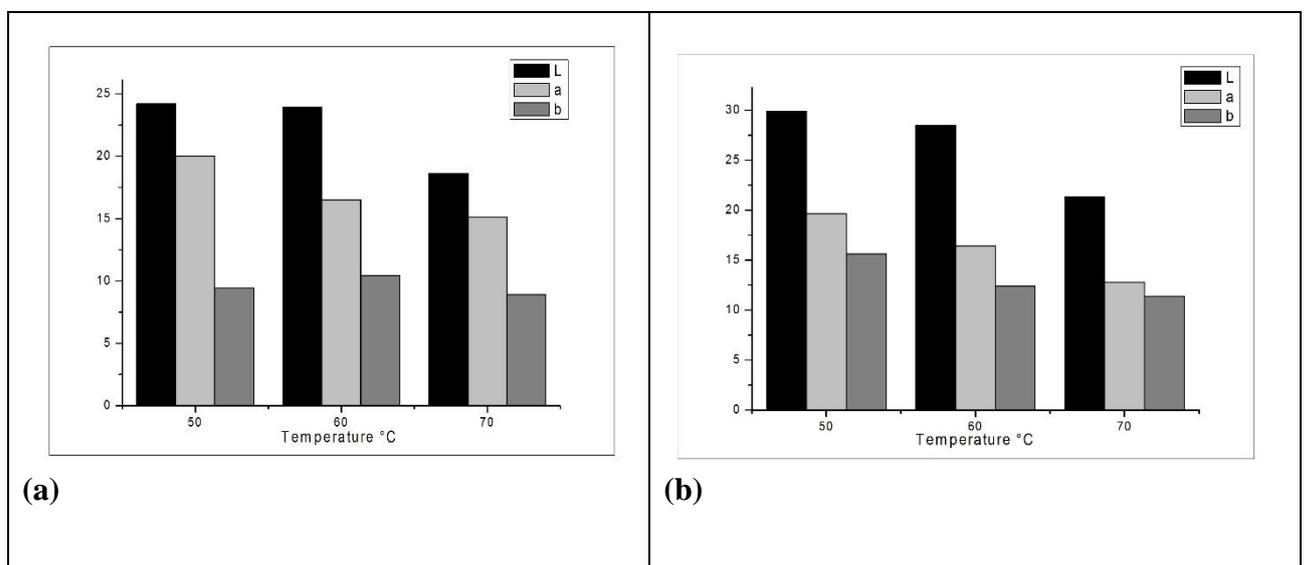


Figure 29: Variation des paramètres de couleur des arilles de la grenade séchés: (a) chauffage convectif et (b) chauffage infrarouge.

La température et le temps de traitement ont une influence considérable sur la couleur. Les valeurs L*, a* et b* augmentent toutes avec le temps de séchage et atteignant des maxima de 29,9, 20,0 et 15,63 respectivement pour le séchage IR à 50°C. L'augmentation de la couleur peut être due à la fois à des réactions de Maillard et à des réactions enzymatiques (Aral et Bese, 2016). Pour les deux méthodes de séchage, la valeur de a* était généralement plus élevée à 50°C qu'à 60°C et 70°C. Cela n'était pas clair pour la valeur b* tandis que la valeur de L* ne diminuait sensiblement qu'à 70°C. Cela peut être dû à l'oxydation enzymatique active à 50°C et moins à 60°C et 70°C en raison de la dénaturation thermique des oxydases (de Oliveira Carvalho *et al.*, 2017). Les polyphénols oxydase et les peroxydases sont les enzymes les plus impliquées dans les processus de brunissement enzymatique. En présence d'oxygène, les polyphénols oxydases catalyse l'hydroxylation des phénols (monophénolase) et l'oxydation des o-diphénols en o-quinones, qui polymérisent ensuite pour donner des pigments bruns. Dans

les fruits et les légumes, il s'agit d'un mécanisme de défense naturel et généralement indésirable pour les consommateurs, à l'exception notable du thé noir (Cao *et al.*, 2018).

La rougeur (a^*) des arilles séchés variait d'un peu moins de 20 pour le séchage infrarouge et convectif à 12,8 pour les arilles séchés par IR à 70°C. Selon Viuda-Martos *et al.*, (2010); la couleur des fruits secs est influencée par plusieurs facteurs: la variété des fruits, la maturité, le processus de séchage et le temps de séchage.

Les pigments sensibles à la chaleur tels que les anthocyanes sont fortement affectés pendant le traitement thermique. Les changements dans une valeur de a^* (du rouge naturel au brunâtre) sont attribués à la destruction des anthocyanes et à l'apparition de produits de réaction non enzymatiques et enzymatiques (Calín-Sánchez, 2013; Horuz, 2015).

3.2.3. Capacité de la réhydratation

Étant donné que les produits alimentaires déshydratés sont généralement réhydratés avant consommation, les caractéristiques de la réhydratation sont utilisées comme indice de qualité (Ergün *et al.*, 2016). Cet indice peut également être considéré comme une mesure des changements physiques et chimiques qui se sont produits dans l'aliment pendant le séchage (Horuz et Maskan, 2015; Aral, 2016; Horuz *et al.*, 2017).

Les capacités de la réhydratation des arilles de la grenade séchés obtenues par séchage convectif et infrarouge ont été calculées à partir de l'équation 21 et sont présentées sur la figure 30. Les courbes montrent que le taux d'absorption d'eau était initialement plus élevé, puis diminué à mesure que la réhydratation se poursuivait. Le taux initial peut être attribué à l'absorption par les capillaires et les cavités près de la surface du produit séché (Beigi, 2017; Horuz *et al.*, 2017).

La figure 30 montre également que pour une température de séchage donnée, la capacité de rétention d'eau des arilles séchés par infrarouge était supérieure à celle des arilles séchés par convection. Pour les deux méthodes de séchage, la capacité de rétention d'eau était sensiblement plus élevée à 60 qu'à 50 ou 70°C. Cela suggère que les changements structurels provoquant une perte de caractère hydrophile (ou une augmentation du caractère hydrophobe); étaient plus importants à ces deux dernières températures, peut-être pour différentes raisons, par exemple une formation accrue de précipités à base de polyphénols à 50°C et une augmentation du brunissement de Maillard et dénaturation thermique à 70°C. Horuz et Maskan, (2015); ont trouvé des résultats similaires pour le séchage des arilles de la grenade par air chaud et par chauffage par micro-ondes.

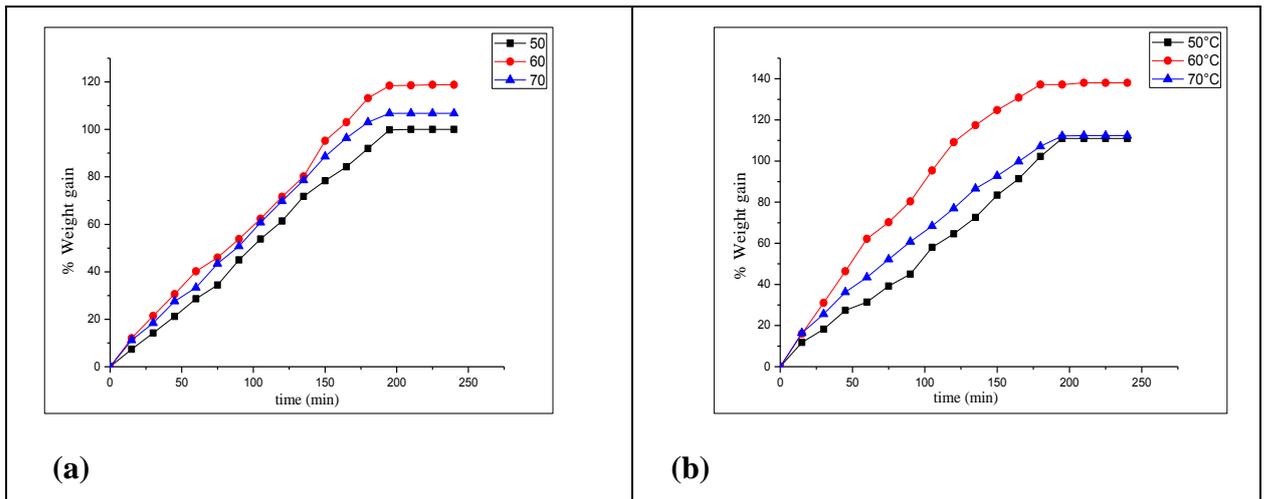


Figure 30: Absorption d'eau par les arilles de grenade séchés aux différentes températures par: (a) séchage convectif et (b) séchage infrarouge.

4. Conclusion

Cette présente étude de l'effet du séchage par convection et par chauffage infrarouge aux différentes températures montre que le temps de séchage des arilles de la grenade diminue et que la diffusivité effective de l'humidité augmente à mesure que la température de traitement augmente. Même si le temps requis est raccourci à une température plus élevée, le séchage par infrarouge à 50°C semble être optimal si les critères sont la teneur totale en polyphénols et l'intensité de la couleur grenat. Si le critère est l'absorption d'eau lors de la réhydratation, le chauffage infrarouge à 60°C semble optimal. Les arilles de la grenade séchés absorbent jusqu'à 100–140% de leur poids en eau.

Chapitre 4:
Effets d'un prétraitement par
CEP sur la membrane des arilles

Effet du champ électrique pulsé sur la membrane des arilles de la grenade

Résumé

Le traitement par champ électrique pulsé (CEP) est une technique non thermique utilisée dans la transformation des aliments. Dans ce travail le traitement par CEP a été effectué avec différentes intensités du champ électrique (0,5, 1 et 1,5kV/cm) et une largeur d'impulsion de 700µs.

Les membranes des arilles de la grenade ont été significativement affectées par le traitement au CEP à des intensités du champ >0,5 kV/cm.

Les changements dans les systèmes membranaires dus au traitement CEP ont été vérifiés par une désintégration accrue de la membrane cellulaire (indice Z de désintégration de la conductivité). L'observation par microscopie électronique a révélé une destruction de la membrane après le traitement au CEP.

Mots clés : Grenade, Champ électrique pulsé, Electroporation.

1. Introduction

Au cours des dernières années le grenadier en particulier ses fruits a connu un intérêt croissant; tant sur le plan économique qu'au sein de la communauté scientifique. Cet intérêt a été motivé non seulement par ses propriétés organoleptiques agréables, mais aussi en étant un produit fonctionnel de grand intérêt en raison de ses avantages pour la santé humaine, car il est riche en antioxydants, minéraux et en vitamines, entre autres composés utiles pour prévenir certaines maladies (**Melgarejo et al., 2020**).

La partie comestible du fruit est constituée d'arilles, qui constituent 52% du poids total du fruit et contiennent 78% de jus et 22% des graines. Les arilles sont consommés frais ou peuvent être conservés sous forme des produits à base du jus transformés (**Sason et Nussinovitch, 2020**). La peau externe de l'arille de la grenade est constituée des cellules (**Caligiani, 2016**). Ces cellules forment une membrane, une couche hydrophobe extracellulaire qui recouvre l'épiderme aérien de toutes les plantes terrestres. D'après des études ultrastructurales, la couche cuticulaire est présente sur divers tissus internes des plantes(**Sason et Nussinovitch, 2020**).

Les dommages des arilles pendant le processus de pelage entraînent une augmentation des taux de respiration et de production d'éthylène, modifient l'activité métabolique, augmentent le taux de la détérioration des attributs nutritionnels et sensoriels et réduisent notamment la durée de conservation (**Venkataramudu et al., 2018**).

De nos jours, de plus en plus les consommateurs exigent des produits alimentaires pratiques et de haute qualité qui ont une saveur naturelle, un goût agréable et une apparence fraîche, avec un minimum d'étapes de traitement nécessaires pour atteindre ces résultats (**Wang et al., 2018**).

Les utilisations des champs électriques pulsés (CEP) comme méthode de conservation des aliments ont été étudiées pendant plusieurs années (**Gudmundsson et Hafsteinsson, 2001**). Le (CEP) applique des impulsions très courtes (nanosecondes, microsecondes, à plusieurs

millisecondes) de forte intensité du champ électrique (de 100 à 300 V/cm à 20–80 kV/cm) à un produit placé entre deux électrodes, ce qui peut conduire à la perméabilisation des membranes cellulaires. L'utilisation de la technologie CEP pour traiter des matériaux solides a montré un grand potentiel pour réduire l'énergie requise pour la transformation ultérieure des aliments (**Liu et al., 2019, Pashazadeh et al., 2020**).

Les effets du CEP dépendent principalement de la force du champ électrique. Par exemple, à des niveaux d'intensité plus faibles, le traitement au CEP est un outil efficace pour augmenter l'efficacité du séchage et améliorer le rendement d'extraction. Des intensités du champ électrique encore plus élevées (10–80 kV/cm) sont utilisées pour la pasteurisation, car les membranes microbiennes sont tellement perturbées que les cellules sont incapables de réparer les dommages et finissent par mourir à ces hautes tensions (**Wang et al., 2018**).

À ce jour, les études ont montré que les réponses des matières végétales solides au CEP sont très variables, complexes et inhomogènes et les effets sur les différents organes et les tissus végétaux sont souvent inégaux et difficiles à prévoir (**Liu et al., 2019**). En fonction de l'intensité du traitement, les membranes des cellules végétales et microbiennes sont affectées de manière significative lorsqu'elles sont exposées au traitement CEP. En fonction du degré d'endommagement des membranes des cellules exposées à un champ électrique, les pores générées peuvent être principalement divisés en deux types: (1) les pores irréversibles, ce qui implique que la cellule est morte ou incapable de réparer les dommages de sorte qu'elle finit par mourir et (2) des pores réversibles, ce qui implique que la cellule n'est pas morte et a le potentiel de récupérer.

Il existe plusieurs méthodes pour étudier les effets du CEP sur les membranes; y compris les méthodes de coloration cellulaire rapide, les techniques diélectriques et la microscopie électronique (**Wang et al., 2018**).

Le présent travail s'est concentré sur un aperçu approfondi de l'impact du CEP sur la dégradation de la membrane cellulaire (la perméabilisation) des arilles de la grenade.

Jusqu'à présent il y a aucune étude étudiée l'effet du CEP sur les arilles de la grenade. Des techniques de microscopie, y compris le microscope électronique à balayage (MEB) ont également été utilisées pour visualiser les changements induits par le CEP aux niveaux des cellules.

2. Matériels et méthodes

2.1. Produit

Les fruits de la grenade (*Punica granatum* L. doux-acide) ont été obtenus au moment de la récolte commerciale de la région d'Ain Touta de la wilaya de Batna (Algérie). Les fruits endommagés ont été enlevés et les peaux extérieures des fruits sains ont été lavées à l'eau du robinet. Les fruits ont été soigneusement coupés dans la zone équatoriale avec un couteau aiguisé et les arilles ont été extraits manuellement. Les arilles extraites ont été recueillies dans un plateau et mélangées pour assurer l'uniformité. Les arilles ont ensuite été réparties au hasard en plusieurs groupes également pesés (30g).

2.2. Prétraitement par champ électrique pulsé (CEP)

Le prétraitement par CEP a été effectué à l'aide d'un système développé au laboratoire sciences des aliments, Département de génie des bioressources, Université McGill, Canada. Le système CEP se compose d'une alimentation haute tension de 0 à 140 kV, d'un condensateur suralimenté de 1 μ F qui a été déchargé à une fréquence d'impulsion de 10 Hz. Différents nombres d'impulsions ont été appliqués, avec une durée de 700 μ s et de forme exponentielle décroissance; surveillé en ligne avec un oscilloscope numérique (Tektronix TDS2024C 200 MHz, USA).

Les échantillons ont été traités dans une chambre de traitement statique composée de deux électrodes parallèles en acier inoxydable. Les tensions d'impulsion appliquées étaient de 2, 3 et 4 kV, résultant en un champ électrique de 0,5, 1 et 1,5 Kv/cm, respectivement (Figure 31). La température a été mesurée en ligne avant et après chaque traitement à l'aide d'un thermocouple (Extech, TM 300, Chine). La température de traitement n'a pas dépassé $30 \pm 2^\circ\text{C}$.



Figure 31: Installation de CEP.

2.3. Estimation du degré de perméabilisation

Les membranes sont les éléments les plus résistants des cellules. Les dommages provoquent une augmentation de la conductivité électrique du produit. Le degré de perméabilisation des tissus (Z) pendant le traitement au CEP a été estimé par la relation suivante (Voboriev et Lebovka, 2011):

$$Z = \frac{\delta - \delta_i}{\delta_d - \delta_i} \quad (22)$$

Où: δ est la conductivité électrique mesurée en (Sm^{-1}) et les indices i et d font respectivement référence à la conductivité tissulaire initiale et endommagée. L'application de l'équation ci-dessus donne un Z égal à 0 pour le tissu intact et à 1 pour le matériau au maximum désintégré.

2.4. Analyse de la couleur

La couleur des arilles a été mesurée à l'aide d'un chromomètre (Minolta, CR-300X, Japon). La couleur est déterminée par L^* , a^* et b^* des paramètres CIE. La variation de la couleur nette (ΔE) a été calculée en utilisant l'équation suivante:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (23)$$

L^* , a^* et b^* indiquent respectivement la légèreté, la rougeur-verdure et le jaunissement-bleuté. ΔE indique le degré de changement de la couleur global d'un échantillon par rapport à la valeur de la couleur d'un échantillon idéal. Les arilles de la grenade frais avaient des valeurs de L^* , a^* et de b^* de $32,27 \pm 1,5$, $21,41 \pm 1,3$ et $7,80 \pm 2,6$, respectivement.

2.5. Microscopie électronique à balayage de la surface de l'arille de la grenade

Une fine couche (une couche épidermique) de la surface externe de l'arille de la grenade a été obtenue à l'aide d'une lame de rasoir et d'une pince à épiler. Cette couche a été déshydratée avec de l'éthanol (50-100%). Pour étudier la structure de la surface des arilles un microscope électronique à balayage Hitachi TM-3000 (Tokyo, Japon) a été utilisé.

2.6. Analyses statistiques

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel SigmaPlot 11.0 (SAS Institute, Cary, NC, USA), y compris ANOVA et le test t de Student pour la comparaison des moyennes ($P < 0,05$).

3. Résultats et discussion

3.1. Effet du traitement CEP sur la perméabilisation cellulaire

L'action de destruction des cellules dans les technologies CEP est basée sur le phénomène connu sous le nom d'électroporation réversible ou irréversible. Lorsqu'une membrane est exposée à un champ électrique externe, une charge s'accumule sur la membrane cellulaire, ce qui entraîne une augmentation artificielle du potentiel transmembranaire. Le CEP peut provoquer l'électroporation des membranes cellulaires sans changements indésirables dans les aliments végétaux (El Kantar *et al.*, 2018; González-Sosa *et al.*, 2014).

Les méthodes bien connues dans l'estimation des dommages de la structure des cellules sont basées sur les mesures de la conductivité (l'indice de décroissance Z) (Lebovka *et al.*, 2004). Cet indice a déjà été utilisé dans divers tissus végétaux (Dermesonlouoglou *et al.*, 2018).

La figure 33 montre les courbes typiques de l'indice de désintégration Z des arilles de la grenade en fonction du nombre des impulsions pour différentes valeurs de l'intensité du champ électrique E. L'intensité du champ et la durée des impulsions ont eu un effet prononcé sur la désintégration des cellules (figure 32). L'augmentation de la force du champ électrique E et du nombre d'impulsions a entraîné une accélération de la cinétique d'endommagement.

La figure 31 a démontré une forte augmentation initiale de la désintégration cellulaire avec l'augmentation de l'intensité du champ et du nombre d'impulsions. Au même nombre d'impulsions, les valeurs de Z étaient les plus élevées pour les arilles traités à 1,5 kv/cm et les plus faibles pour les arilles traités à 0,5 kv/cm. Un indice de désintégration cellulaire de 0,9 a été obtenu à 0,5, 1 et 1,5 kv/cm, avec 250, 200 et 150 impulsions respectivement. Une tendance similaire a également été observée par (Ade-Omowaye *et al.*, 2000; Ersus et Barrett, 2010; El Kantar *et al.*, 2018).

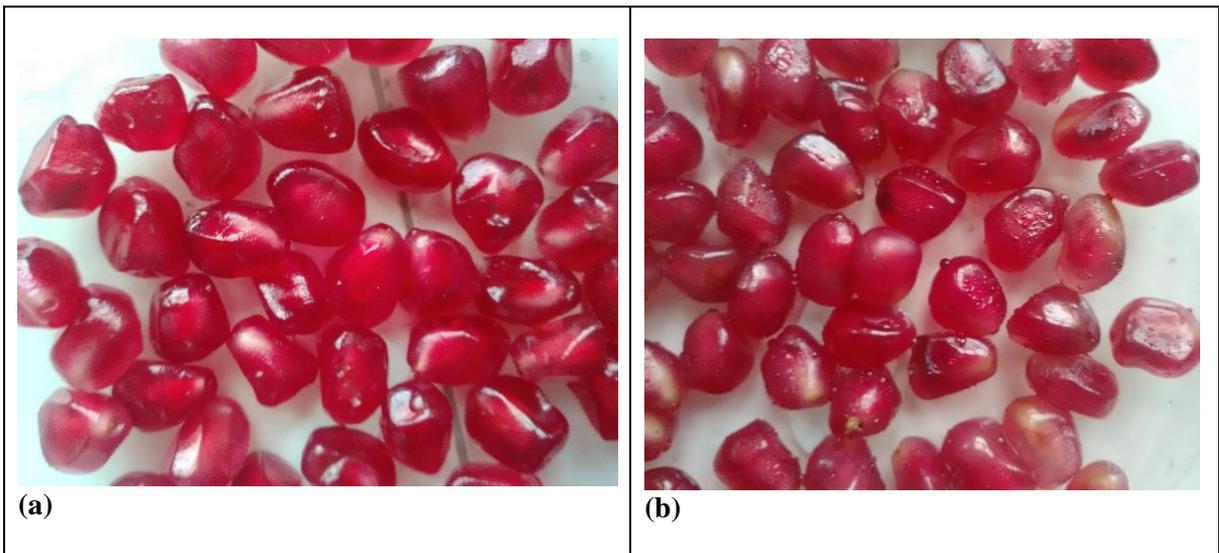


Figure 32: Effet du CEP sur la perméabilisation des arilles de la grenade : (a) avant CEP et (b) après CEP

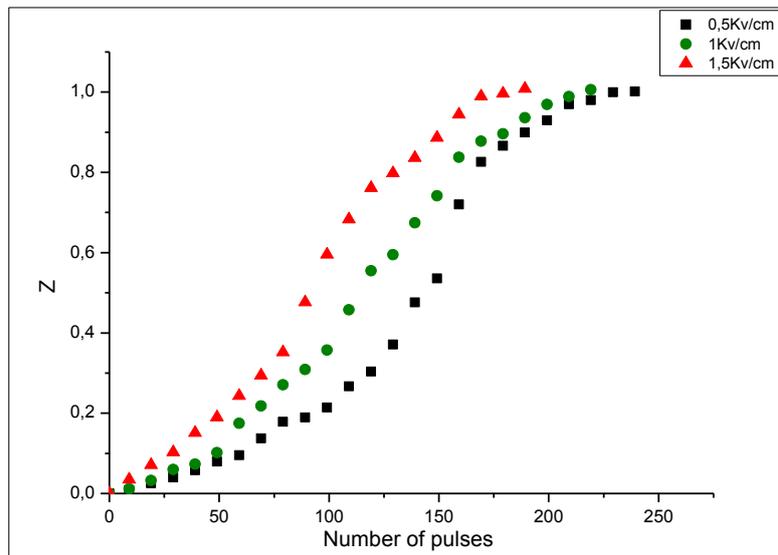


Figure 33: Indice de désintégration en fonction du nombre d'impulsion et de l'intensité du champ électrique.

L'indice Z a été utilisé pour sélectionner les conditions optimales de traitement du CEP. Il est important de définir les conditions optimales du processus pour atteindre le degré maximum de la perméabilisation des cellules en utilisant les conditions les plus douces et moins d'énergie.

3.2. Images MEB

L'évaluation de l'efficacité de l'électroporation dans les tissus biologiques des plantes ou la suspension des cellules est une tâche assez compliquée (Barba *et al.*, 2015). Une analyse plus approfondie de toute altération structurelle provoquée par le CEP a été réalisée en utilisant

MEB (HITACHI TM-3000, Japon). Des images MEB d'arille de la grenade non traités et traités au CEP aux différentes intensités (0,5, 1, 1,5 Kv/cm) sont présentées sur la figure 34.

Des résultats ont montré que pendant le traitement au CEP, les membranes cellulaires se sont effondrées. Le prétraitement CEP augmente les dommages structurels et provoque une perte partielle de la disposition des cellules ordonnées. Les images MEB indiquent également la présence de rupture et de fragilité des parois cellulaires des arilles de la grenade traités. Cependant, l'examen visuel des images MEB a révélé une différence significative dans la microstructure cellulaire des tissus des arilles non traités et traités au CEP.

Il existe également une différence significative dans la microstructure cellulaire des tissus des arilles traités avec du CEP aux différentes intensités. En pratique, l'efficacité de l'électroporation dépend des détails du protocole: le nombre d'impulsions, l'intensité du champ électrique E et la durée totale du traitement, sont les principaux paramètres qui régissent l'efficacité du traitement CEP (**Barba et al., 2015**). De plus, on peut voir que l'image de l'échantillon frais montre une structure cellulaire hexagonale lisse et proéminente (Figure 34b). La structure cellulaire de l'échantillon traité semble conserver une forme cellulaire. Pour les arilles congelés et décongelés, à l'instar des études précédentes, la congélation-décongélation entraîne une déformation notable des cellules (**Jalté et al., 2009**).

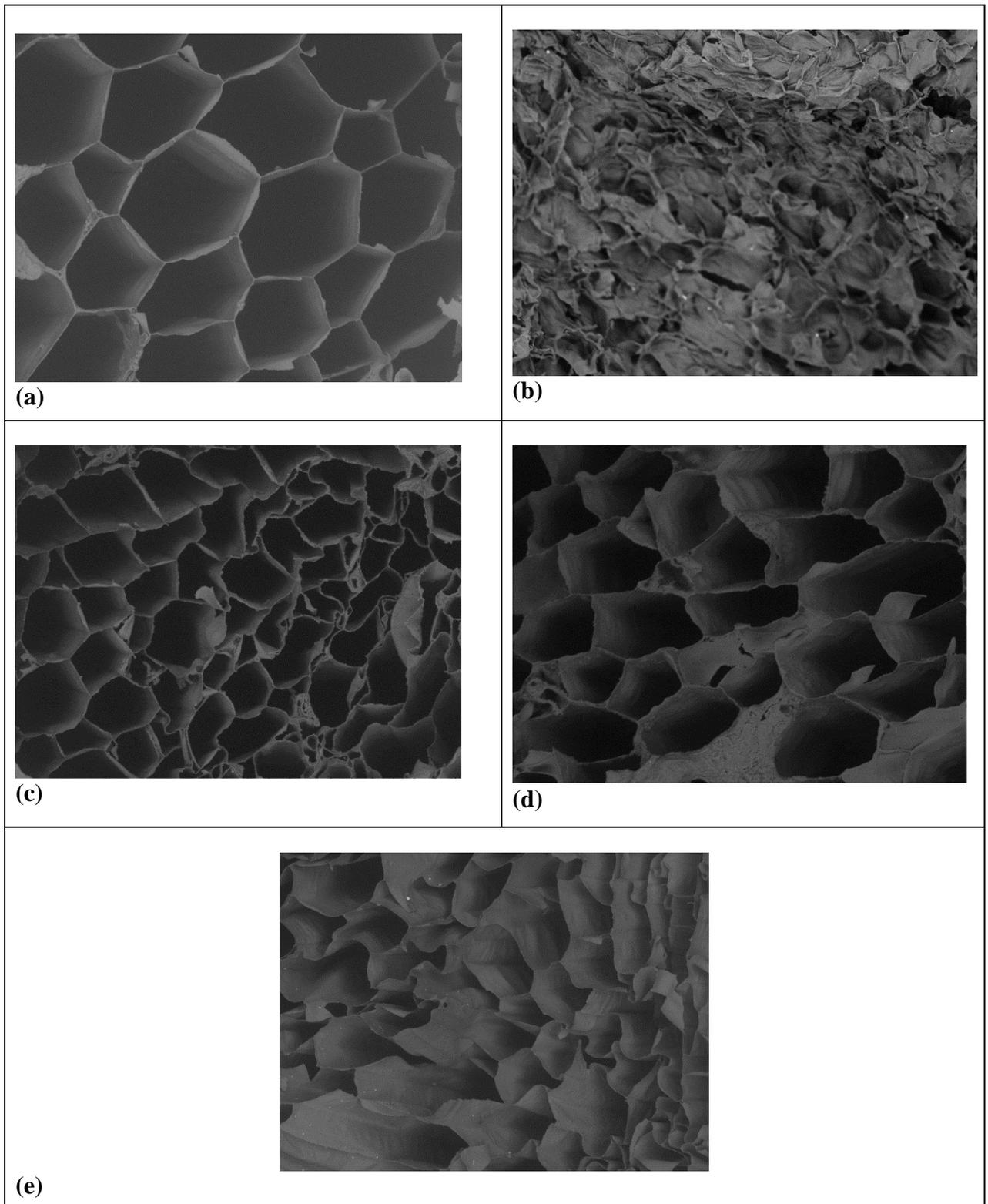


Figure 34: Images microscopiques des arilles de la grenade: a) non traités, b) décongelés, c) prétraités à 0,5Kv/cm, d) prétraités à 1Kv/cm et e) les arilles prétraités à 1,5Kv/cm.

3.3. Changements de la couleur pendant le prétraitement

La couleur est reconnue comme un facteur majeur affectant l'acceptation des produits alimentaires. En raison du caractère complexe de l'électroporation, l'impact du CEP sur la couleur n'est pas clair. D'une part, l'électroporation provoque la fuite de contenu intercellulaire et donc l'activité de certaines enzymes serait renforcée. Par exemple, des changements de la couleur ont été signalés pour la pomme (**Grimi et al., 2010; Wiktor et al., 2015**), les asperges blanches (**Janositz et al., 2011**), les bleuets (**Yu et al., 2018**) et les fraises (**Tylewicz et al., 2017**) qui ont été soumis au traitement CEP. D'un autre côté, le CEP peut inactiver les enzymes qui peuvent inhiber le changement de la couleur. Aucun changement de la couleur n'a été signalé pour l'extrait de thé vert (**Zhao et al., 2009**), les cerises rouges (**Sotelo et al., 2018**), le jus de la carotte et de la tomate (**Odrizola-Serrano et al., 2009**) qui ont été soumis à un traitement CEP. La modification des paramètres optiques de l'aliment par l'application de CEP dépend fortement des propriétés du matériau et des conditions de traitement (**Wiktor et al., 2015**).

Les paramètres de la couleur des arilles frais soumis à des traitements CEP sont présentés dans le tableau 16. Les valeurs de la légèreté (L^*), du jaunissement (b^*) et de la rougeur (a^*) des arilles traités par CEP étaient significativement différentes par rapport aux non traités ($p < 0,05$). Les valeurs de rougeur (a^*) ont montré une augmentation après tout traitement au CEP, tandis que la légèreté (L^*) et le jaunissement (b^*) ont diminué après le traitement au CEP à 0,5 kV/cm.

Tableau 16: Effets du prétraitement CEP sur la couleur des arilles.

Intensité du champ (KV/cm)	L^*	a^*	b^*	ΔE
Control	40,27± 0.12	21,41± 0.16	7,80 ± 0.07	/
0.5	39,46± 0.09	22,14± 0.18	5,22± 0.11	4,43
1	38,18± 0.16	23,15± 0.10	4,69± 0.08	5,91
1.5	39,94± 0.11	25,09± 0.12	4,09± 0.16	6,54

Les échantillons traités par CEP à 0.5KV/cm présentait une dégradation de la couleur la plus faible. Dans cette étude, le CEP a modifié la couleur des arilles frais de la grenade. Ce qui a entraîné un abaissement des valeurs de la luminosité ou de la blancheur (L), une augmentation de la rougeur (a) et une diminution du jaunissement (b); perçues visuellement comme une couleur rouge foncé par rapport aux arilles frais.

Taiwo et al., (2003); ont signalé que l'application prolongée d'impulsions induisait des réactions entraînant une diminution de la légèreté. **Tylewicz et al., (2017)**; ont rapporté que la légèreté (L) des échantillons des fraises diminuait aux des intensités du champ > 0,1 kV/cm.

La diminution de la clarté ou de l'assombrissement des échantillons traités au CEP pourrait être liée à la libération plus élevée d'enzymes telles que la peroxydase et la polyphénol oxydase et leurs substances après l'électroporation des membranes cellulaires (Tylewicz et al., 2017).

Des résultats similaires ont été observés par Odriozola-Serrano et al., (2009); qui ont traité la tomate frais par CEP.

4. Conclusions

L'impact des champs électriques pulsés sur la perméabilisations de la membrane des arilles de la grenade a été étudié. En conclusion, le traitement au CEP a augmenté la perméabilisation de la membrane cellulaire des arilles et cela en fonction de l'intensité du champ électrique appliqué et le nombre des impulsions.

L'observation microscopique par MEB a révélé la destruction des membranes après le traitement au CEP. Les différents indices de désintégration (Z) ont permis de caractériser les dommages induits par le CEP et l'efficacité de l'électroporation. Par conséquent, les résultats obtenues prouvent la bonne efficacité du traitement CEP pour l'amélioration de l'électroporation de la membrane des arilles est à des intensités plus élevées (1.5KV/cm) avec un nombre des impulsions le plus court.

De plus, on peut voir que l'image de la structure cellulaire de l'échantillon traité a été conserver une forme cellulaire.

Chapitre 5:
Effets d'un prétraitement par
CEP sur le séchage des arilles

I. Etude de l'effet d'un prétraitement par champ électrique pulsé sur le séchage convectif des arilles de la grenade

Résumé

Ce travail traite l'effet des paramètres du champ électrique pulsé (CEP) sur le processus du séchage par convection des arilles de la grenade. Les paramètres de traitement du CEP et leur influence sur la perturbation cellulaire ont été étudiés en appliquant diverses intensités du CEP ($E = 0,5, 1$ et $1,5\text{kV/cm}$).

Le coefficient de diffusion D_{eff} a été calculé et une modélisation mathématique a été effectuée. Le CEP améliore la diffusion interne et entraîne une augmentation du taux de séchage. Le coefficient de diffusion de l'eau le plus élevé ($1,80 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$) a été calculé pour les échantillons soumis à un traitement par CEP à $1,5 \text{ KV/cm}$ suivi par un séchage à 70°C . Le temps du séchage des échantillons soumis à un traitement par CEP variait de 180 à 720 min, alors que dans le cas des arilles non traités, le temps du séchage était de 330 à 1020 min. Une réduction du temps de séchage liée au CEP est de 29,41%, 41,17% et 45,45% à 50, 60 et 70°C respectivement.

Ces arilles traitées séchées sont caractérisées par une teneur élevée en polyphénols totaux et une capacité antioxydante élevée. La cinétique de séchage a été modélisée par différents modèles. Ceux qui correspondent le mieux aux données du séchage étaient Midilli *et al.*, suivi d'un modèle logistique logarithmique et modifié.

Mots clés : Grenade, Champ électrique pulsé, Electroporation, Séchage convectif.

1. Introduction

La grenade (*Punica granatum* L.), appartenant à la famille des Punicaceae, est un arbuste. La partie comestible du fruit de la grenade est constituée d'arilles, qui sont riches en acides organiques, vitamines, sucres, anthocyanes et en composés bioactifs.

Pour prolonger la durée de conservation des arilles, différents procédés du séchage ont été appliqués; cependant, ils ont eu un impact significatif sur la qualité des produits finaux (**Cano-Lamadrid *et al.*, 2017**).

L'industrie du séchage des aliments a un énorme potentiel à l'échelle mondiale, car les aliments secs gagnent en popularité en raison de leur goût acceptable, de leur valeur nutritionnelle importante et de la demande d'aliments prêts à manger et de saison tout au long de l'année (**Khan *et al.*, 2020**).

Le séchage des aliments est l'une des méthodes les plus anciennes et les plus importantes pour la conservation des aliments (**Liu *et al.*, 2019**; **Hasan Masud *et al.*, 2020**). Les objets biologiques bruts (aliments, légumes et fruits) ont une teneur élevée en humidité ($\approx 90\%$). Par conséquent, ils nécessitent l'élimination de l'eau libre disponible dans les plantes pour la croissance microbienne et les différentes réactions de dégradation enzymatique et oxydative. En règle générale, les fruits secs peuvent contenir de 12 à 14% d'eau, tandis que les légumes contiennent de 4 à 8% d'eau (**Vorobiev et Lebovka, 2020**). L'élimination de l'humidité du produit entraîne une durée de conservation plus longue en termes d'activité microbiologique minimisée pendant le stockage, ce qui permet de produire des produits stables et durables avec des coûts de transport et de stockage réduits (**Dibagar *et al.*, 2020**).

La technologie du séchage la plus utilisée dans l'industrie alimentaire est le séchage à air chaud ou plutôt par convection. Pendant le séchage par convection, l'énergie thermique est appliquée au matériau alimentaire humide en soufflant de l'air chauffé sur le produit. Par conséquent, l'humidité du produit s'évapore ou se vaporise si la température d'ébullition est dépassée. De plus, l'air chauffé sert de moyen de transport pour l'humidité évaporée (**Ostermeier et al., 2018**).

Ces techniques présentent cependant des nombreux inconvénients différents. Actuellement, beaucoup d'efforts sont consacrés à la recherche des méthodes alternatives de prétraitement avant le séchage. Les techniques les plus récentes sont: les traitements aux ultrasons (US) et aux champs électriques pulsés (CEP) (**Wiktor et al., 2019**).

La plupart des prétraitements, qui visent à améliorer le séchage, dépendent de la perturbation de la structure cellulaire native des aliments d'origine végétale (**Wiktor et al., 2019**). Le CEP est une technique de traitement alimentaire non thermique basée sur l'électroporation des membranes cellulaires dans les tissus biologiques entraînant une augmentation de la perméabilité cellulaire (**Thamkaew et Galindo, 2020**). La technologie CEP est basée sur l'application d'impulsions électriques de haute tension dans un temps très court à un produit, placé entre deux électrodes (**Blahovec et al., 2017**). La polarisation de la membrane cellulaire induite par la présence du champ électrique conduit à l'électroporation de la membrane. Ainsi, les processus de transfert de masse peuvent être améliorés sans modifications indésirables de la qualité du produit (**Alles et al., 2020**).

L'application de CEP comme traitement de pré-séchage a attiré l'attention des chercheurs en raison de la diminution du temps de séchage qui en résulte, ce qui est particulièrement bénéfique pour le séchage des aliments sensibles à la chaleur comme: la pomme, la noix de coco, les pommes de terre et les carottes (**Lebovka et al., 2007; Thamkaew et Galindo, 2020**).

D'autre part, l'application de CEP amélioré la couleur et l'arôme des produits séchés (**Thamkaew et Galindo, 2020**).

Par conséquent, l'objectif principal de la présente étude était d'étudier les impacts du traitement au CEP sur le processus de séchage des arilles de la grenade par convection aux différentes températures. Différentes intensités du champ électrique ont été testées pour déterminer l'influence sur le processus du séchage et sur la qualité physico-chimique et nutritionnelle des arilles.

2. Matériels et méthodes

2.1. Produit

Des fruits frais de la grenade (*P. granatum* L. doux-acide) ont été obtenus en automne dans la ville d'AinTouta (Batna, Algérie). Les fruits ont été récoltés à pleine maturité avec les caractéristiques suivantes: pH $3,56 \pm 0,06$ et $15 \pm 0,09^\circ$ Brix. Ils ont été conservés au réfrigérateur à $4 \pm 1^\circ\text{C}$ jusqu'à leur utilisation. Avant les processus du séchage, la grenade a été lavée et coupée et les arilles ont été séparés manuellement. Les arilles abîmés ont été retirés et jetés.

2.2. Prétraitement par champ électrique pulsé (CEP)

Le prétraitement par CEP a été effectué à l'aide d'un système développé au laboratoire de technologie alimentaire, Département de technologie alimentaire, Ecole nationale supérieure agronomique, Alger. Le système CEP consistait en une alimentation haute tension 0-140 kV, un condensateur suralimenté de $1 \mu\text{F}$ déchargé à une fréquence d'impulsion de 10 Hz. Différents nombres d'impulsions ont été appliqués avec une forme exponentielle décroissance et une durée de $700 \mu\text{s}$. La surveillance en ligne a été effectuée avec un oscilloscope numérique (Tektronix TDS2024C 200 MHz, USA) (Figure 35).

Les échantillons ont été traités dans une chambre de traitement statique composée de deux électrodes parallèles en acier inoxydable. Les tensions pulsées appliquées étaient de 2, 3 et 4 kV, résultant des champs électriques de 0,5, 1 et 1,5 kV/cm, respectivement. La température a été mesurée en ligne avant et après chaque traitement à l'aide d'un thermocouple (Extech, TM 300, Chine). La température de traitement n'a pas dépassé $30 \pm 2^\circ\text{C}$.

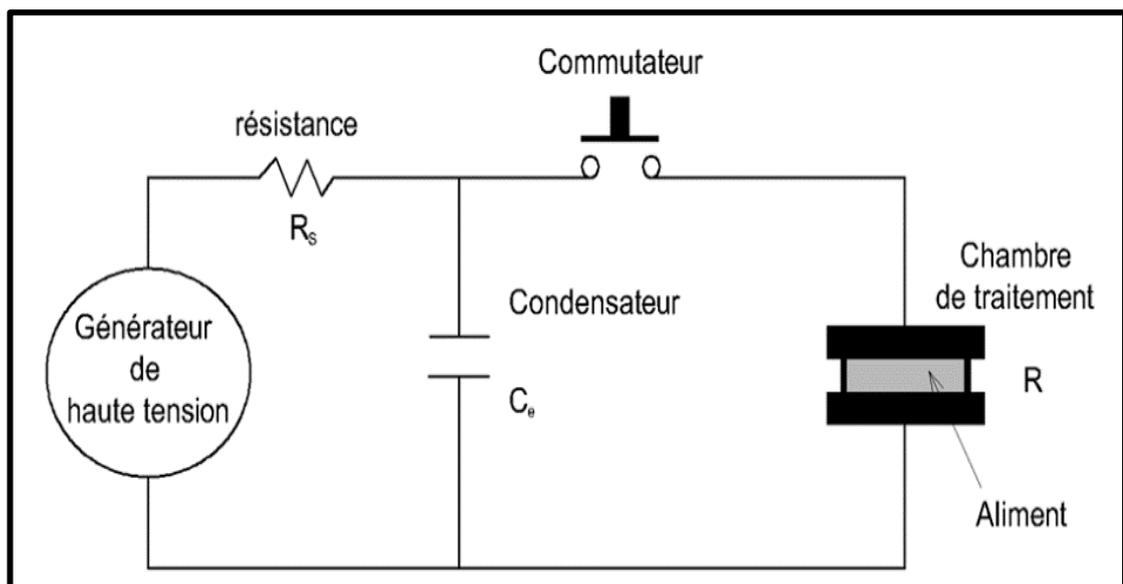


Figure 35: Schéma d'installation CEP.

2.3. Séchage convectif

Le séchage convectif a été réalisé dans un four ventilé MEMMERT (UF750, Allemagne). Le séchoir d'armoire se compose essentiellement d'un ventilateur centrifuge pour alimenter le flux d'air, l'élément chauffant électrique, le filtre à air et le panneau de commande. La température de l'air est contrôlée au moyen d'un régulateur proportionnel et la vitesse de l'air est régulée par le contrôle de l'unité de vitesse du ventilateur.

Le processus de séchage a été effectué à trois températures différentes 50, 60 et 70°C. La vitesse de l'air a été maintenue constante ($2,0 \pm 0,1$ m/s) et la perte du poids de l'échantillon pendant le séchage a été mesurée à des intervalles de 10 min. Le processus du séchage a été arrêté lorsque la teneur en humidité des échantillons est devenue constante. Les arilles de la grenade séchées sont emballés dans des sacs en polyéthylène sous vide après refroidissement.

2.4. Modélisation mathématique du processus de séchage

2.4.1. Cinétique de séchage

Le taux d'humidité (MR) des arilles de la grenade a été calculé à l'aide de l'Eq. (24):

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (24)$$

Où: M_t et M_0 sont les teneurs en humidité (kg d'eau/kg dm) au temps "t" et au temps "0", respectivement, M_e est l'humidité à l'équilibre (kg d'eau/kg dm).

Différents modèles de cinétique de séchage ont été utilisés pour décrire le séchage de la grenade (tableau 17). L'analyse de régression non linéaire a été réalisée à l'aide du logiciel Sigma Plot\SPW11 (version 11, 2008, USA) pour ajuster les données expérimentales des modèles d'équation sélectionnés. Une analyse statistique a été utilisée pour évaluer l'ajustement des données expérimentales aux différents modèles où (R^2) est le coefficient de détermination, (χ^2) est la réduction du chi carré et (RMSE) est l'erreur quadratique moyenne. Ces paramètres ont été calculés à l'aide des équations ci-dessous:

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{ei} - MR_{pi})^2}{N - Z} \quad (25)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{ei} - MR_{pi})^2} \quad (26)$$

Où: M_{Rei} est le taux d'humidité expérimental, M_{Rpi} est le taux d'humidité prévu, N est le nombre d'observations et Z est le nombre des constants dans un modèle.

Tableau 17: Modèles mathématiques utilisés pour décrire le taux d'humidité de la courbe de séchage en couche mince.

No.	Nom du modèle	Equation	Reference
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$	Bruce, (1985)
2	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Hashim et al., (2014)
3	Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Midilli et al., (2002)
4	Two-term	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(k_1t)$	Sacilik, (2007)
5	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	Togrul et Pehlivan, (2002)
6	Modified Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	Zenoozian et al., (2008)
7	Wang and Singh	$MR = 1 + a + bt^2$	Wang et Singh, (1978)

2.4.2. Détermination de la diffusion efficace de l'humidité (D_{eff})

La diffusivité effective a été calculée sur la base de la deuxième loi de Fick de l'équation de diffusion (Eq. 27):

$$\frac{\delta M}{\delta t} = D_{eff} \nabla^2 M \quad (27)$$

La solution analytique de l'Eq. (27) pour la migration d'humidité par diffusion dans un objet sphérique à température constante pendant le processus de séchage est donnée par:

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{L^2} t\right) \quad (28)$$

Où: D_{eff} est la diffusivité effective de l'humidité (m^2/s), t est le temps de traitement (s), L est la demi-épaisseur de l'échantillon (m).

Pour des périodes de séchage plus longues, l'Eq.29 a été utilisée:

$$\ln MR = \ln \frac{6}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff}}{L^2} t \quad (29)$$

La diffusivité effective a été obtenue en traçant les données expérimentales de séchage exprimées en termes de $\ln(MR)$ en fonction du temps, où la pente de la courbe "K" est calculée par l'Eq. (30):

$$K = \frac{\pi^2 D_{eff}}{R^2} \quad (30)$$

2.4.3. Calcul de l'énergie d'activation

La dépendance à la diffusivité de l'humidité effective et de la température est décrite par l'équation d'Arrhenius (Eq.31).

$$D_{eff} = D_0 e^{\frac{E_a}{R(T+273,15)}} \quad (31)$$

Où: D_0 est le facteur pré-exponentiel d'Arrhenius (m^2/s), E_a (kJ/mol) est l'énergie d'activation,

R est la constante de gaz universelle 8,31 (kJ/mol·K) et T (°C) est la température.

2.5. Qualité physico-chimique et biochimique des arilles séchés

2.5.1. Analyse de la couleur

La couleur des échantillons séchés a été mesurée en utilisant un chromomètre (Minolta, CR-300X, Japon). La couleur est déterminée comme L*, a* et b* des paramètres CIE. L*, a* et b* indiquent respectivement la légèreté, la rougeur-verdure et le jaunissement-bleuissement.

2.5.2. Analyse de la texture

La dureté des arilles a été déterminée en utilisant un analyseur de texture (Instron 4502, USA) avec une sonde à plaque de compression de 100 mm. L'analyseur de texture était relié à un ordinateur qui enregistrait et analysait les données via un logiciel. Les conditions de fonctionnement de l'instrument étaient les suivantes: vitesse de pré-test de 1,5 mm/s, vitesse de test de 0,5 mm/s, vitesse de post-test de 10,0 mm/s, force de déclenchement était de 0,10 N. La dureté a été mesurée pendant cinq différents échantillons.

2.5.3. Polyphénols totaux

La procédure d'extraction modifiée de **Süfer et Palazoğlu (2019)** a été utilisée dans cette étude. Un gramme d'échantillon des arilles séchés broyés a été mélangé avec 10 ml de méthanol à 80%. Le mélange a ensuite été vortexé pendant 15s, traité aux ultrasons pendant 20 min à 25°C (Fisher Scientific FS30, Mexique) et centrifugé pendant 15 min (Sigma 4-5L, Allemagne). Les surnageants ont été filtrés et stockés à 4°C jusqu'à l'analyse spectrophotométrique. Une solution de méthanol (80%) a été utilisée comme blanc dans toutes les analyses et chaque essai a été effectué en triple.

La méthode Folin-Ciocalteu mentionnée par **Süfer et Palazoğlu (2019)** a été utilisée pour déterminer la teneur totale en phénol des arilles de la grenade. La procédure a consisté à mélanger 0,5 ml d'extrait avec 0,5 ml de réactif Folin-Ciocalteu; auquel 3 ml de Na₂CO₃ à 10% ont été ajoutés. Le mélange a ensuite été placé dans l'obscurité pendant 30 minutes. L'absorbance a été mesurée à une longueur d'onde de 760 nm en utilisant un spectrophotomètre (Shimadzu, UV 1800, Japon). Les résultats ont été exprimés en mg GAE (équivalent d'acide gallique)/kg de matière sèche.

2.5.4. Capacité antioxydante

Les activités d'élimination des radicaux libres ont été évaluées en utilisant la méthode des radicaux 2,2 diphényl-1-picrylhydrazyle (DPPH) décrite par **Calín-Sánchez et al., (2012)**. Pour chaque échantillon, 2 g des arilles séchés ont été homogénéisés dans 5 ml de MeOH/eau (80:20 v/v) puis centrifugées à 15 000 tr/min pendant 20 min. Dix µl du surnageant ont été mélangés avec 40 µl de MeOH et ajoutés à 950 µl d'une solution de DPPH 0,094 mM. Après incubation pendant 50 min dans un endroit sombre, les absorbances ont été mesurées à une longueur d'onde de 515 nm à l'aide d'un spectrophotomètre (Shimadzu, UV 1800, Japon). Les résultats ont été exprimés en mg d'équivalent Trolox/g de matière sèche.

2.6. Analyses statistiques

L'analyse de variance (ANOVA) a été réalisée en utilisant les procédures General Linear Models (GLM) du logiciel SigmaPlot\SPW11 (version 11, 2008, USA). Les expériences ont été effectuées en triple et les moyennes des trois ensembles de données ont été utilisées. Les moyennes ont été séparées par la différence la moins significative selon le test à plages multiples de Duncan.

3. Résultats et discussion

3.1. Comportement des arilles de la grenade au séchage

3.1.1. Taux d'humidité et taux de séchage

Du point de vue technique, le séchage est un processus basé sur le transfert de chaleur et de masse. La plupart des prétraitements, qui visent à améliorer le séchage, dépendent de la perturbation de la structure cellulaire native des aliments d'origine végétale (**Wiktor et al., 2019**).

Le CEP est une technique de traitement alimentaire non thermique basée sur l'électroporation des membranes cellulaires dans les tissus biologiques entraînant une augmentation de la perméabilité cellulaire (**Thamkaew et Galindo, 2020**).

Les mesures de la désintégration cellulaire ont montré une augmentation significative de la perturbation cellulaire à une intensité du champ plus élevée. Par conséquent, une formation des pores ultérieurs à l'intérieur de la membrane cellulaire devient plus avec l'augmentation du niveau de traitement. Par conséquent, la libération d'humidité hors de l'espace intercellulaire sera facilitée en raison d'un transfert de masse amélioré (Chapitre 4).

Les essais du séchage ont été effectués aux différentes températures de séchage (50, 60 et 70°C) et aux différentes intensités (0.5, 1 et 1.5Kv/cm) sont présentées sur la figure 36.

La diminution du taux d'humidité MR est augmentée avec l'augmentation de la température de séchage et l'intensité du champ. De plus, tous les échantillons traités au CEP ont montré une diminution plus élevée de la MR que les échantillons non traités séchés à la même température. Dans l'ensemble, le CEP a pu réduire le temps du séchage pour tous les échantillons. A une température du séchage de 70°C, le temps de séchage a diminué après le traitement CEP de 330 à 180 min, ce qui correspond à une diminution en pourcentage de 45.45%.

En conclusion, on peut affirmer que la différence entre les temps de séchage pour les échantillons non traités et traités au CEP augmente avec l'augmentation de la température du séchage selon les essais menés. En outre, on peut observer que l'effet accélérateur le plus élevé du prétraitement CEP sur la vitesse du séchage a été atteint à la température du séchage la plus élevée (70°C).

Cette relation est en corrélation avec les résultats des études de **Lebovka et al., (2007)** et **Janositz et al., (2011)**; qui ont examiné l'influence du traitement CEP sur le séchage des pommes de terre. Ils ont montré un taux de séchage plus élevé avec un indice de désintégration de conductivité Z croissant.

De plus on peut observer que l'augmentation de la température de l'air a considérablement réduit le temps du séchage. La diminution rapide du taux d'humidité est due à l'augmentation du taux d'alimentation en air des arilles, ce qui entraîne une migration accélérée de l'humidité hors des arilles. Des résultats similaires ont également été obtenus par plusieurs chercheurs sur le séchage de la grenade (**Mphahlele et al., 2019**).

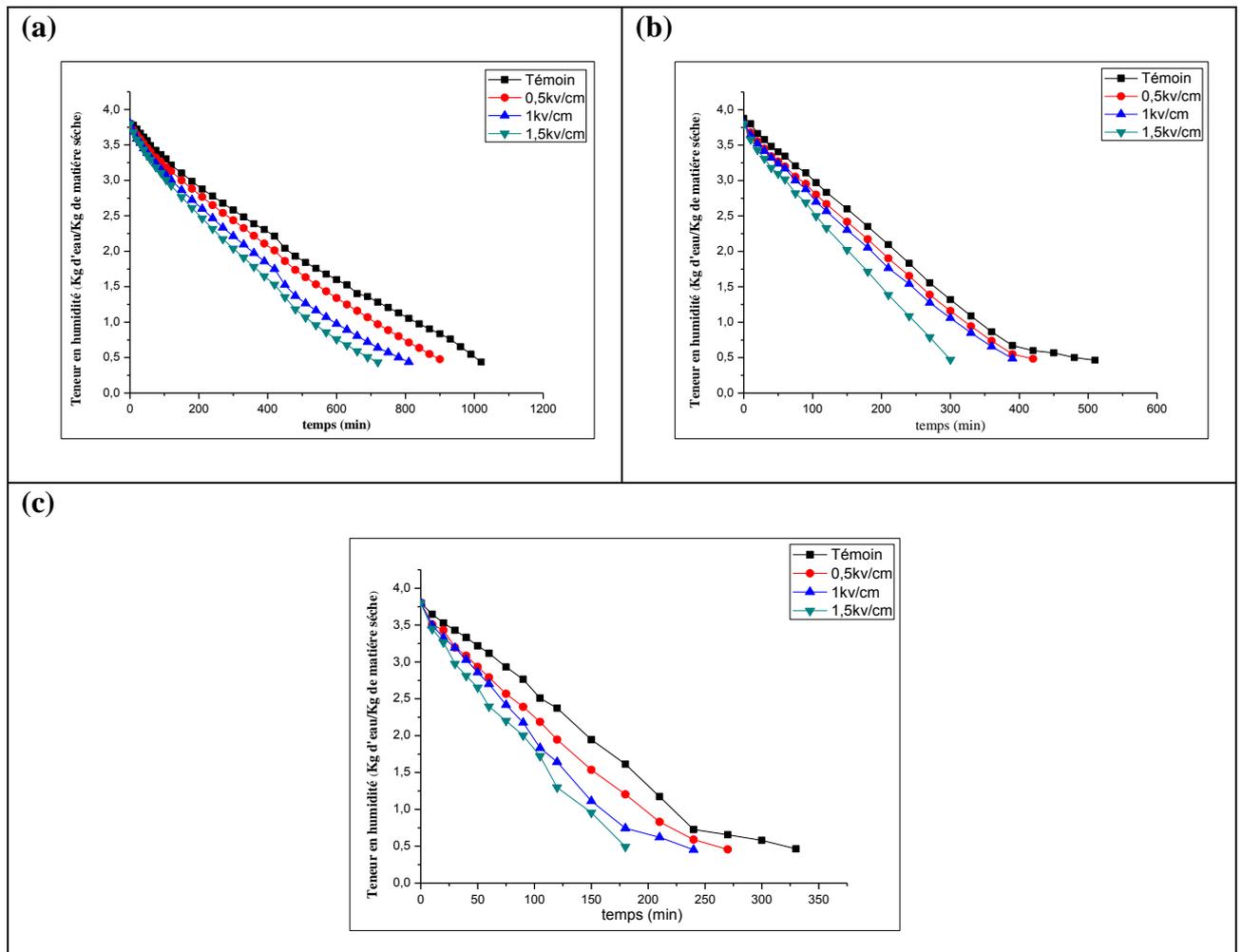


Figure 36: Influence de l'intensité du champ électrique et de la température sur la teneur en humidité des arilles de la grenade aux différentes températures: a) à 50, b) à 60 et c) à 70°C.

3.1.2 Évaluation des modèles de séchage

La modélisation mathématique décrire les courbes du séchage pour des arilles non traités et traités au CEP avec différents paramètres de CEP et aux différentes températures est présentée dans le tableau 18.

Le meilleur modèle sélectionné était basé sur le coefficient de détermination le plus élevé (R^2) et les valeurs d'erreur standard (χ^2 et RMSE) les plus faibles (tableau 19). La fourchette de R^2 pour toutes les données analysées se situait entre 0,9768 et 0,9999.

Le modèle Midilli et *al.* a été identifié comme le meilleur modèle descriptif pour toutes les températures du séchage avec le R^2 le plus élevé et les valeurs de (χ^2 et RMSE) les plus basses par rapport aux autres modèles de séchage et a confirmé la déclaration de (Doymaz, 2012a; Mphahlele et *al.*, 2019) selon laquelle le modèle Midilli et *al.* (2002) et logarithmique s'adapte bien en ce qui concerne le séchage convectif des arilles.

Tableau 18: Qualité d'adaptation des modèles de séchage à l'air chaud prétraité par CEP aux différentes températures.

Model 50°C	Coefficients	Témoin	0.5KV/cm	1Kv/cm	1.5Kv/cm
MR = exp(-k·t)	R ²	0,9927	0,992	0,9926	0,9932
	χ ²	0,001145626	0,001284791	0,001241253	0,00113252
	RMSE	0,033431774	0,035356283	0,034709439	0,03312303
MR = a exp(-k·t)	R ²	0,9938	0,9924	0,0021	0,9934
	χ ²	0,001079302	0,001241846	0,001265931	0,00109782
	RMSE	0,032041434	0,034274182	0,034517598	0,03208128
MR = a exp(-k·t) + c	R ²	0,9995	0,9997	0,9992	0,9995
	χ ²	0,000271088	0,000640899	0,000357049	9,9826E-05
	RMSE	0,015850927	0,024267969	0,018042857	0,00951145
MR = a exp(-k₀·t) + b exp(k₁·t)	R ²	0,9938	0,9997	0,9928	0,9995
	χ ²	0,001137643	0,00066032	0,00135308	0,00010339
	RMSE	0,032041434	0,024267969	0,03455277	0,00951145
MR=a exp(-k·tⁿ)+b·t	R ²	0,9997	0,9999	0,9993	0,9997
	X ²	5,94192E-05	0,000520974	0,000198411	0,00011284
	RMSE	0,007223085	0,021226692	0,013008953	0,00975785
MR = a exp(-k·t) + b exp(-g·t) + c exp(-h·t)	R ²	0,9997	0,9997	0,9928	0,9995
	χ ²	6,11169E-05	0,000699714	0,001449202	0,00011180
	RMSE	0,007223085	0,024212535	0,034546496	0,00953112
MR = 1 + a·t + b·t²	R ²	0,9995	0,9996	0,9992	0,9994
	X ²	0,000147876	0,000182394	0,000141558	0,00023799
	RMSE	0,011707084	0,012946235	0,011360786	0,01468612 7
Model 60°C	Coefficients	Témoin	0.5Kv/cm	1Kv/cm	1.5Kv/cm
MR = exp(-k·t)	R ²	0,9879	0,9858	0,9886	0,9851
	χ ²	0,002416672	0,002194459	0,001830442	0,11688217
	RMSE	0,048079097	0,045815362	0,041700356	0,33224797
MR = a exp(-k·t)	R ²	0,9918	0,9887	0,9908	0,9865
	χ ²	0,001723568	0,00182848	0,001565237	0,00193818
	RMSE	0,039669796	0,040859296	0,037532834	0,04150698
MR = a exp(-k·t) + c	R ²	0,9972	0,9994	0,9998	0,9995
	χ ²	0,000656801	0,000209579	3,65581E-05	0,00071306
	RMSE	0,023898347	0,01349972	0,005574437	0,02437659
MR = a exp(-k₀·t) + b exp(k₁·t)	R ²	0,9927	0,9894	0,9913	0,9995
	χ ²	0,001697164	0,001911187	0,001656642	0,00076399
	RMSE	0,03744336	0,039734199	0,036404854	0,02437659
MR=a exp(-k·tⁿ)+b·t	R ²	0,9973	0,9995	0,9998	0,9999
	X ²	0,000692458	0,000269448	0,000113252	0,00018514
	RMSE	0,023279247	0,014521446	0,009216235	0,01156363
MR = a exp(-k·t) + b exp(-g·t) + c exp(-h·t)	R ²	0,9918	0,9894	0,9913	0,9999
	χ ²	0,002089854	0,002136032	0,001893305	0,00020039
	RMSE	0,039302354	0,039734199	0,036404854	0,01155851
MR = 1 + a·t + b·t²	R ²	0,9981	0,9995	0,9998	0,9995
	X ²	0,000517714	9,30067E-05	3,33543E-05	9,5225E-05
	RMSE	0,021217588	0,008993075	0,005324576	0,00890813

Model70°C	Coefficients	Témoin	0.5Kv/cm	1Kv/cm	1.5Kv/cm
MR = exp(-k·t)	R ²	0,9768	0,9888	0,987	0,988
	χ ²	0,004377885	0,001797646	0,002204118	0,00162818
	RMSE	0,064301396	0,041052321	0,045356116	0,03876780
MR = a exp(-k·t)	R ²	0,9835	0,9904	0,9894	0,9886
	χ ²	0,003319576	0,000282099	0,001932482	0,00168865
	RMSE	0,054320663	0,038072812	0,040924534	0,03780024
MR = a exp(-k·t) + c	R ²	0,9952	0,999	0,9969	0,9979
	χ ²	0,001045831	0,000215435	0,000625747	0,00037081
	RMSE	0,029521616	0,0132303	0,022374044	0,01688920
MR = a exp(-k₀·t) + b exp(k₁·t)	R ²	0,9856	0,991	0,9905	0,9979
	χ ²	0,003305133	0,001806649	0,002044336	0,00041202
	RMSE	0,050701664	0,036810143	0,038719247	0,01688920
MR=a exp(-k·tⁿ)+b·t	R ²	0,9954	0,999	0,9969	0,9986
	X ²	0,001169464	0,000209709	0,000772438	0,00032881
	RMSE	0,029062223	0,012007295	0,022692696	0,01422497
MR = a exp(-k·t) + b exp(-g·t) + c exp(-h·t)	R ²	0,9835	0,991	0,9905	0,9986
	χ ²	0,004426102	0,002167979	0,002498633	0,00037579
	RMSE	0,054320663	0,036810143	0,038719247	0,01422497
MR = 1 + a·t + b·t²	R ²	0,9957	0,9991	0,9976	0,9978
	X ²	0,0009637	0,000192959	0,000513555	0,00037383
	RMSE	0,028338729	0,012521158	0,02026929	0,01695773

3.1.3. Diffusivité efficace de l'humidité (D_{eff})

Un traitement combiné basé sur le CEP a entraîné une augmentation du coefficient de diffusion efficace de l'eau D_{eff} (figure 37). Le D_{eff} des échantillons prétraités variait de 2.70×10^{-9} à 5.80×10^{-9} m²/s tandis que les échantillons témoins présentaient un D_{eff} de 3.00×10^{-9} à 1.20×10^{-8} m²/s. Des valeurs plus élevées de D_{eff} ont été trouvés lorsque le protocole de prétraitement a commencé avec le CEP à 1.5KV/cm. Une telle situation peut être liée à une structure électroporée induite par le champ électrique. Ainsi, les processus de transfert de masse peuvent être améliorés sans modifications indésirables de la qualité du produit (Alles et al., 2020).

De plus, comme prévu à la figure 37, les valeurs de D_{eff} ont augmenté avec l'augmentation de la température de l'air. Cette augmentation est due à l'augmentation du potentiel de transfert de chaleur entre les arilles de la grenade et l'air de séchage, améliorant ainsi l'évaporation de l'eau du produit. Un effet similaire de la température de l'air sur la diffusivité humidité pendant le séchage à l'air chaud a déjà été constaté dans les arilles (Doymaz, 2012b).

Les valeurs de D_{eff} obtenues à partir de cette étude se situent dans une fourchette générale de 10^{-12} – 10^{-8} m²/s pour le séchage des produits alimentaires (Doymaz, 2011).

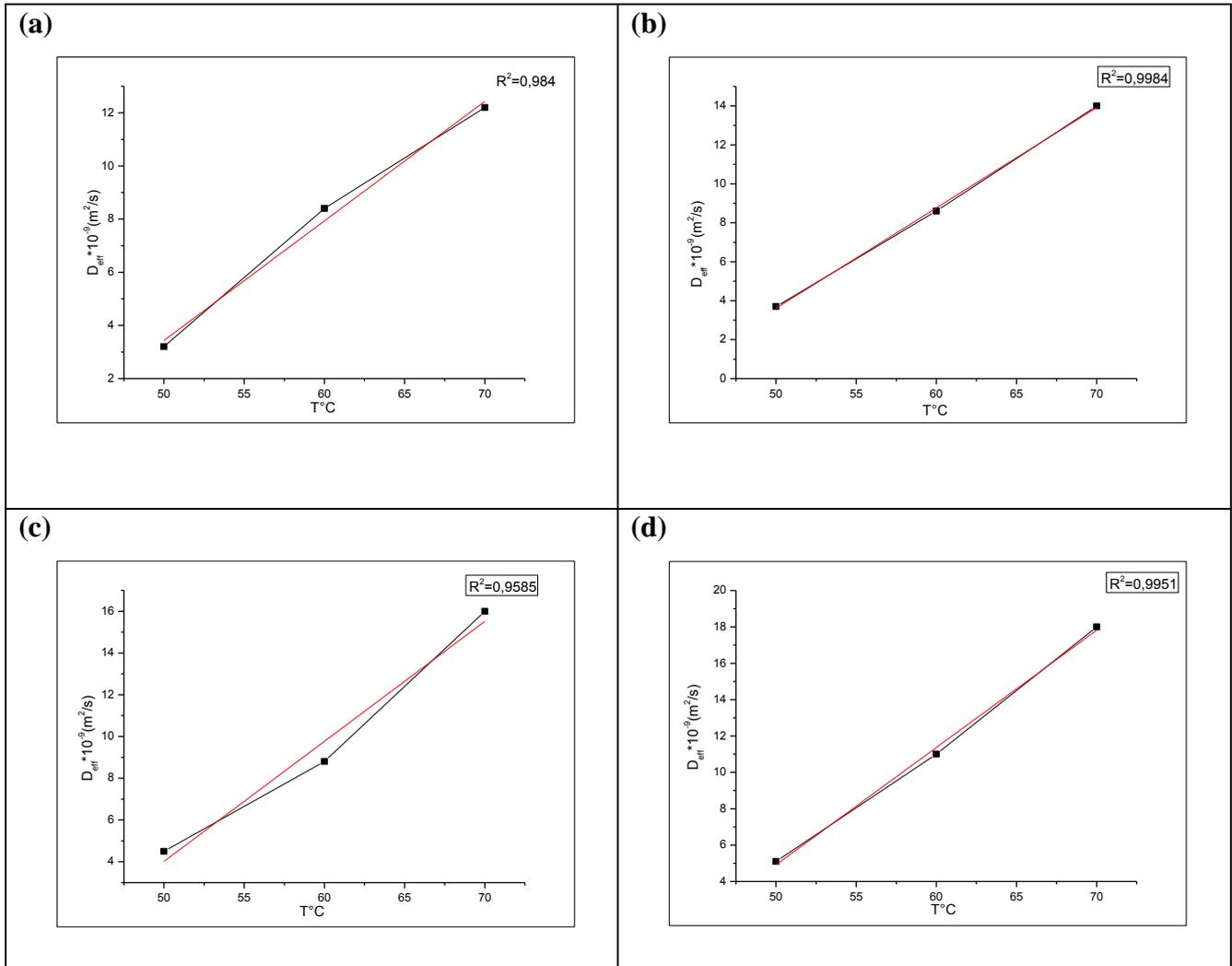


Figure 37: Diffusivité effective pendant le séchage en fonction de l'intensité du champ électrique : a) non traités, b) prétraités à 0,5KV/cm, c) prétraités à 1KV/cm et d) prétraité à 1.5KV/cm.

3.1.4. Détermination de l'énergie d'activation (E_a)

La consommation d'énergie est variée selon le prétraitement et la température de séchage dans le séchage des arilles de la grenade.

L'énergie d'activation (E_a) a été déterminée en traçant (D_{eff}) en fonction $1/T$. Ensuite, E_a a été calculé en utilisant l'Eq. (31). Le minimum et le maximum de l' E_a pour les arilles de la grenade dans les différentes conditions étaient de 42.40 à 48.61 kJ/mol. Selon **Mphahlele et al., (2019)**; la valeur de l' E_a se situe dans la plage générale de 12,7 à 110 kJ/mol pour des nombreux matériaux alimentaires. La valeur obtenue dans cette étude est inférieure de **(Doymaz, 2011)** pour le séchage des arilles de la grenade par convection.

3.2. Qualité physico-chimique biochimique des arilles séchés

Le séchage des aliments s'accompagne des différents processus complexes de transfert de chaleur et de masse. Les différentes transformations physiques et chimiques et redistributions de l'humidité et de la température peuvent se produire pendant le séchage des changements dans la couleur, la texture, l'odeur ou d'autres propriétés (**Vorobiev et Lebovka, 2020**).

3.2.1. Couleur

La figure 38 montre les propriétés optiques des échantillons étudiés. La légèreté des arilles diminuait légèrement après le séchage par rapport à l'initiale en raison de la réduction des pigments rouges et de l'apparition de pigment foncé par réaction de Maillard (**Rahaman et al., 2019**).

Des changements plus prononcés ont été notés pour les paramètres a^* et b^* , qui représentent respectivement la part des couleurs rouge et jaune. Les échantillons traités par CEP présentaient des valeurs plus faible de rougeur (a^*) et de b^* par rapport aux arilles séchés non traités. Le prétraitement influence les changements de la structure dus au phénomène de désintégration de la membrane cellulaire lors du traitement CEP ce qui influence et accélère le séchage (**Wiktor et al., 2019**). La valeur a^* peut changer en raison de la formation des composés colorés.

De plus; Les grenades contiennent une variété des pigments anthocyanes différents et sont sensibles aux applications thermiques. L'augmentation de la valeur de a^* peut être attribuée à la destruction des anthocyanes et apparition des réactions de Maillard pendant le séchage entraînant un changement de la couleur d'un rouge naturel ou violet à une couleur brun plus terne (**Horuz et Maskan, 2015**).

La température et le temps de séchage sont des paramètres importants pour le changement de la couleur pendant le séchage. Aux basses températures du séchage, le matériau entre en contact avec l'air pendant longtemps pour sécher. Pendant une longue période du séchage, l'oxydation des pigments peut entraîner un brunissement enzymatique et non enzymatique et le matériau peut changer de la couleur. Les résultats ont montré que la température du séchage de manière significative ($p < 0,05$) a affecté la couleur.

Ces résultats sont en accord avec les travaux précédents pour les carottes (**Liu et al., 2020**) et pour les arilles de la grenade (**Horuz et Maskan, 2015; Cano-Lamadrid et al., 2017**).

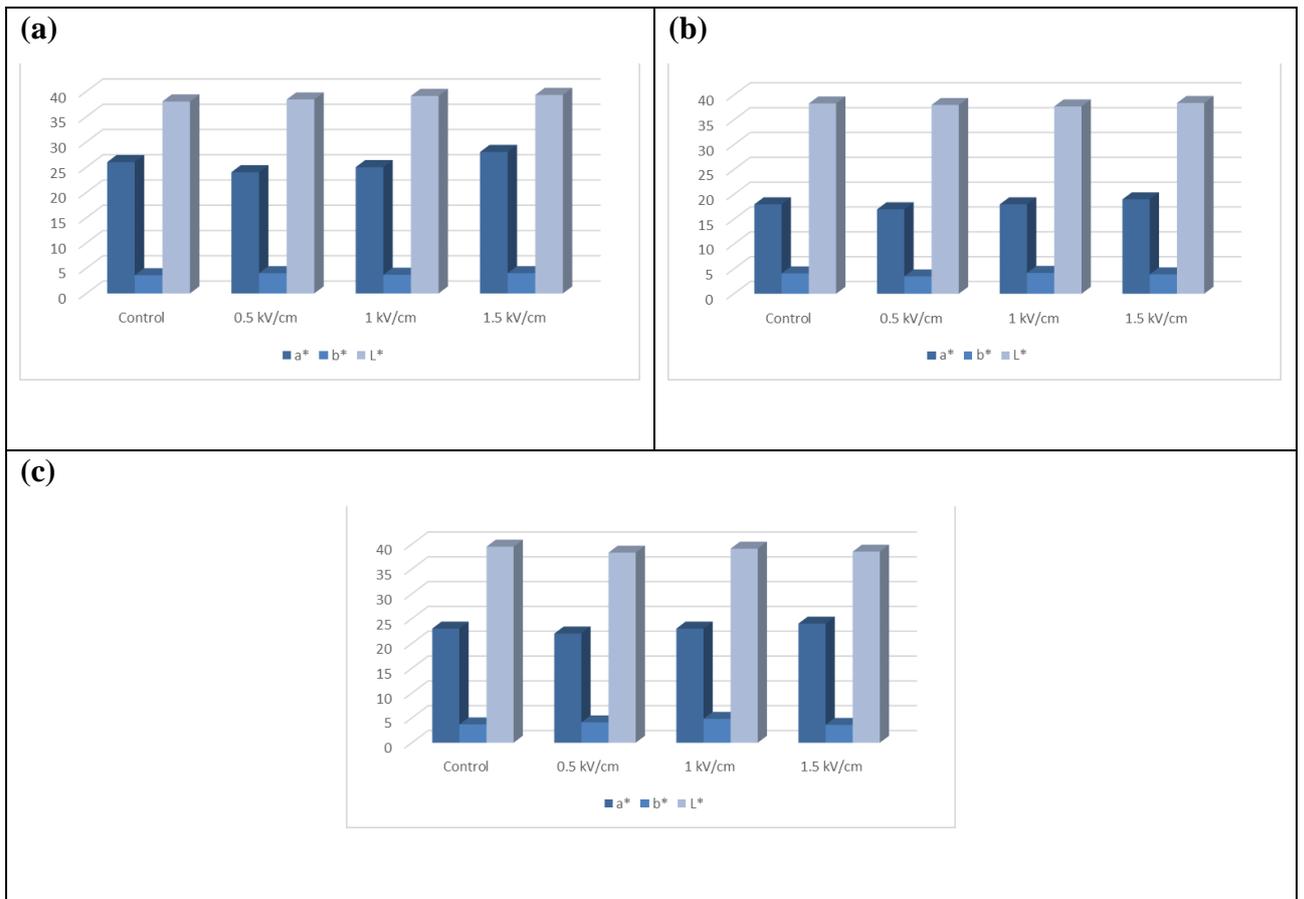


Figure 38: Couleur des arilles séchés en fonction de la température et de l'intensité du champ électrique: a) à 50, b) à 60 et c) à 70°C.

3.2.2. Texture

La texture est l'un des paramètres physiques les plus importants pour les produits déshydratés, ce qui peut considérablement influencer l'acceptabilité du consommateur. Les propriétés mécaniques des produits alimentaires séchés sont affectées par la teneur en humidité, la composition des aliments, le pH et le stade de maturation de la matière première (**Fauster et al., 2020**).

Pour la détermination des propriétés mécaniques des arilles séchés, une mesure de la texture a été effectuée. Les résultats du test de pénétration mesurés après séchage ont représentés sur la figure 39. La force maximale diminue de manière significative de 50.07 à 54.1 N pour les arilles non prétraités et de 36.2 à 48.87 N pour les arilles prétraités par CEP. On peut dire que le CEP a diminué la dureté des arilles séchés par rapport aux échantillons non traités.

Ben Ammar et al., (2010) et **Lammerskitten et al., (2019)**; ont également signalé un ramollissement notable pour les pommes de terre et les pommes prétraitées en CEP lyophilisées. La structure plus molle des échantillons prétraités peut s'expliquer par l'augmentation de la formation de pores due au CEP, ce qui conduit à un retrait réduit et à une

porosité plus élevée des échantillons (Fauster et al., 2020).

Les arilles déshydratés à 70°C ont été les plus durs en raison de la diffusion rapide de l'humidité dans un temps de séchage plus court. Des résultats similaires ont été rapportés par (Süfer et Palazoğlu, 2019) pour les arilles de la grenade séchés dans les mêmes conditions.

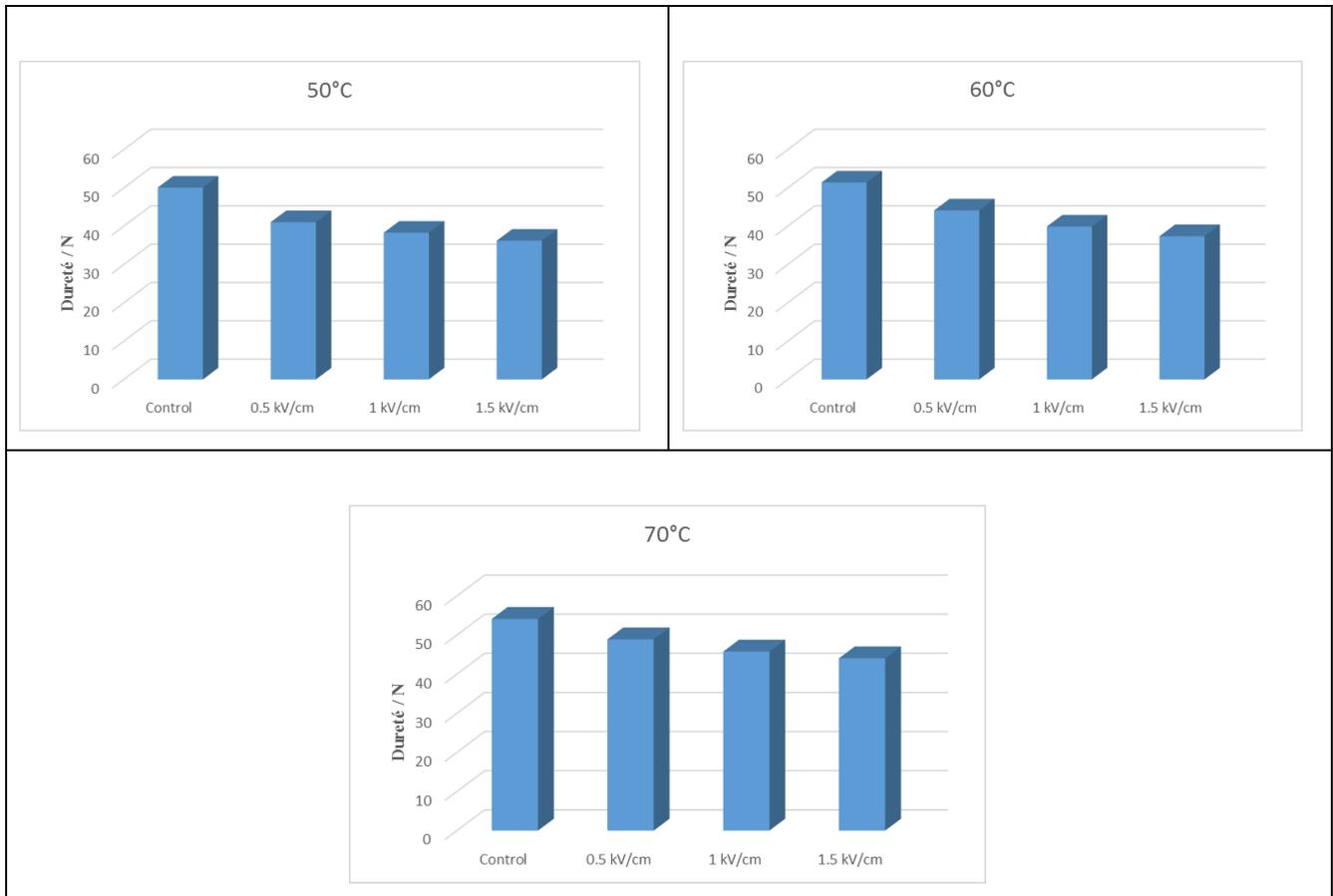


Figure 39: Texture des arilles séchées en fonction de la température et de l'intensité du champ électrique.

3.2.3. Phénoliques totaux

Au cours des dernières décennies, les polyphénols ont suscité l'intérêt de la communauté scientifique et de l'industrie alimentaire en raison de leurs avantages pour la santé et de leur utilisation potentielle comme additifs alimentaires (Silva et al., 2016).

Le traitement thermique des produits végétale dégrade très souvent les composés bioactifs. Un tel comportement est lié par exemple à l'utilisation des températures élevées qui accélèrent les réactions de dégradation (Nowacka et al., 2019).

Des rapports ont montré que le CEP permet aux aliments de conserver leur couleur, leur saveur et leur valeur nutritive (Ade-Omowaye et al., 2001; Martín-García et al., 2020). Cependant, son utilisation comme méthode de prétraitement a révélé une influence positive sur certains paramètres de qualité étudiés.

La teneur totale en composés phénoliques des arilles séchées traitées et non traitées est indiquée dans la figure 38. Le contenu phénolique le plus élevé a été observé dans les arilles prétraitées par CEP à 1.5 KV/cm et séchées à 50°C. En fait, **Kim et al., (2019)**; ont rapporté que la conductivité des échantillons de ginseng augmentait avec l'application de CEP à 1,5 et 2,5 kV/cm, alors qu'aucun effet n'était observé lorsque 0,5 kV/cm était appliqué par rapport aux échantillons non traités.

Comme la figure 40 montrée que le processus du séchage a provoqué une perte significative de la teneur totale en phénols, en particulier à des températures élevées. La teneur en polyphénols des échantillons séchés à une température inférieure était supérieure à celle de l'échantillon séché à une température plus élevée. Des résultats similaires ont été rapportés par (**Süfer et Palazoğlu, 2019**).

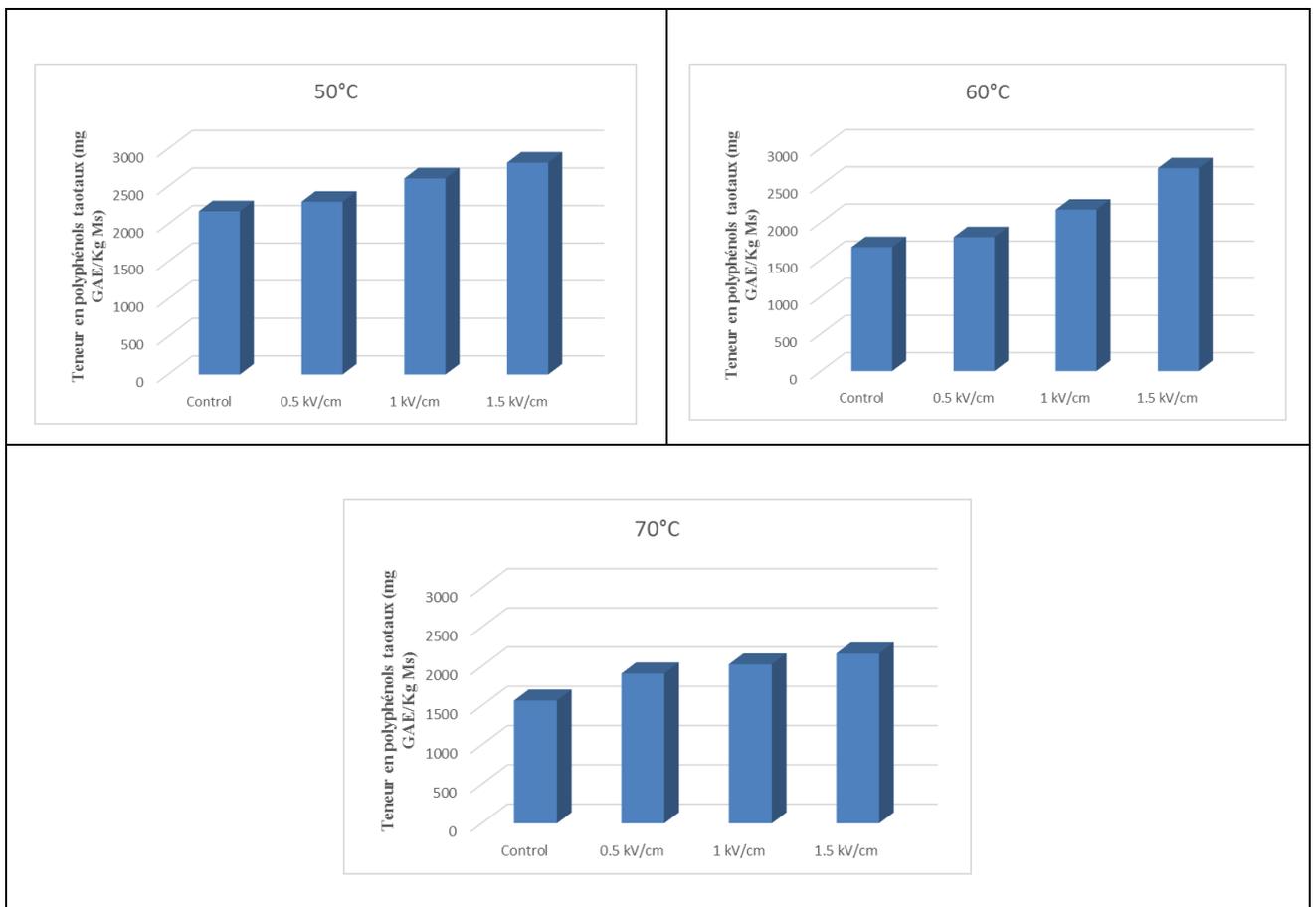


Figure 40: Teneur en polyphénols totaux des séchés aux différentes intensités et aux différentes températures.

3.2.4. Capacité antioxydante

L'effet du traitement CEP et de la température du séchage à l'air chaud des arilles de la grenade sur la capacité antioxydante est illustré dans la Figure 41.

Différentes méthodes utilisées pour mesurer la capacité antioxydante des aliments sont

basées sur différents principes (piégeage des radicaux libres). La capacité antioxydante des arilles séchés a été évaluée en utilisant le test DPPH.

L'activité d'élimination des radicaux DPPH était significativement plus élevée ($p < 0,05$) dans les échantillons traités par rapport au non traités. Les résultats obtenus dans la présente étude sont en accord avec les résultats de (Huang *et al.*, 2019) qui ont montré que le CEP augmentait significativement l'activité antioxydante des framboises.

L'activité antioxydante de tous les échantillons a diminué après le séchage à l'air chaud, ce qui est en accord avec les études précédentes qui indiquaient que l'activité antioxydante diminuait lorsque les aliments étaient séchés dans une plage de températures de 60 à 80°C (Huang *et al.*, 2019).

L'activité antioxydante des échantillons séchés à une température inférieure était supérieure à celle de l'échantillon séché à une température plus élevée. Ces résultats sont cohérents avec la teneur totale en polyphénols rapportée ci-dessus pour les arilles séchés (figure 39). Dans cette optique, certaines études ont indiqué qu'il existe une corrélation entre la teneur totale en polyphénols et l'activité antioxydante dans le piégeage des radicaux DPPH dans différents fruits (Galaz *et al.*, 2017).

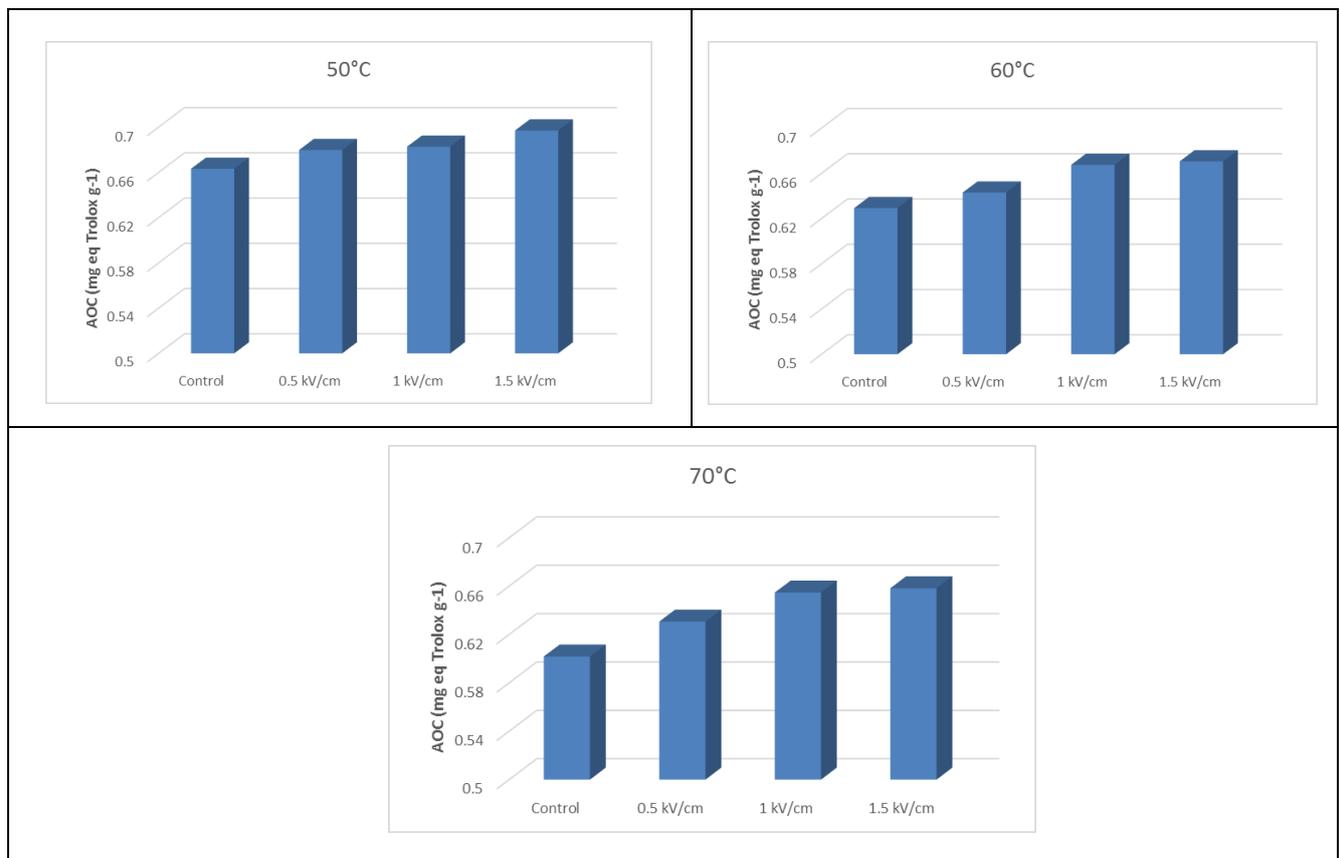


Figure 41: Activité antioxydante des arilles séchés aux différentes intensités et aux différentes températures.

4. Conclusion

L'impact d'un prétraitement CEP sur le séchage convectif des arilles de la grenade a été étudié. Il a été démontré qu'une augmentation de l'intensité du champ électrique jusqu'à 1.5 kV/cm entraînait une augmentation de l'indice de désintégration cellulaire. Il a été constaté que la désintégration élevée des cellules facilite la libération d'humidité à la surface du produit.

De plus, l'évaluation du coefficient de diffusion à la température de séchage constante (70°C) a révélé que la diffusion efficace de l'humidité pouvait être augmentée de 3×10^{-9} à 1.20×10^{-8} m²/s dans le tissu prétraité par CEP.

La diffusion la plus élevée entraîne une réduction de 51,42 % du temps de séchage pour les échantillons prétraités CEP (1,5 kV/cm) séchés à 70°C.

Également, ce travail a prouvé que le modèle Midilli et *al.*, (2002), est approprié pour décrire le séchage convectif des arilles à des températures constantes.

II. Effet du prétraitement par champ électrique pulsé sur le comportement des arilles de la grenade pendant le séchage par micro-ondes assisté à l'air chaud

Résumé

Dans cette étude, l'impact du prétraitement par CEP sur la cinétique du séchage par micro-ondes assisté à l'air chaud et la qualité des arilles de la grenade a été évalué. Les arilles de la grenade ont été soumis à un prétraitement par CEP aux différentes intensités du champ électrique de 0,5, 1 et 1,5 kV/cm avec l'application des impulsions exponentielles d'une durée de 700 μ s suivies d'un séchage par micro-ondes assisté à l'air chaud aux différentes températures.

Les arilles ont été séchées à 50, 60 et 70°C avec des temps de séchage variant de 65 à 190 minutes pour les arilles traités par CEP, tandis que pour les arilles non traités le temps du séchage variait de 90 à 250 minutes. Le coefficient de diffusion le plus élevé est $8,25 \times 10^{-8}$ m²/s a été calculé pour les arilles soumis à une intensité du champ électrique de 1,5 kV/cm et séchés à une température de 70°C.

Les arilles séchées traités au CEP avaient la meilleure couleur que les arilles séchées non traités. Ces arilles séchées sont caractérisées par une teneur élevée en polyphénols totaux (3350,28 mg GAE/kg MS) et une capacité antioxydante élevée (0,6 mg éq Trolox/g). La cinétique du séchage a été modélisée par différents modèles. Les modèles qui correspondent le mieux aux données de séchage étaient Midilli et *al.*, suivi d'un modèle logistique logarithmique et modifié.

Mots clés : Grenade, Champs électriques pulsés, Séchage par micro-ondes assisté à l'air chaud.

1. Introduction

L'Algérie est l'un des principaux producteurs de la grenade parmi les pays méditerranéens, avec des productions annuelles totales de 717,063 t à 790,374 t au cours des dernières années (Meziane et *al.*, 2016). La grenade (*Punica granatum* L), communément appelée grenade, granats et pomme punica, est un fruit appartenant à la famille des Punicaceae et aurait des propriétés thérapeutiques considérables (Amri, 2017). Il est originaire de l'Asie du Sud-Est et pousse dans presque toutes les régions de la Méditerranée (Kalaycioglu et Erim, 2017; Khwairakpam et *al.*, 2018).

Les grenades sont généralement disponibles sur le marché sous forme des fruits frais ou des boissons, tels que jus concentré (Cano-Lamadrid et *al.*, 2017). Les parties comestibles du fruit de la grenade représentaient 52% du poids total du fruit, contenant 78% de jus et 22% de graines (Karimi et *al.*, 2017). Le fruit contient des quantités substantielles des polyphénols, des flavonoïdes (anthocyanes, flavonols), des tanins hydrolysables (ellagitanins, gallotanins, tanins condensés) et des proanthocyanidines. La composition chimique des fruits diffère selon le cultivar, la région de croissance, la maturité, le climat et les conditions de stockage (Boussaa et *al.*, 2018; Chater et *al.*, 2018).

La température recommandée pour le stockage dépend du cultivar et varie de 0 à 5°C et la durée de conservation varie de 8 à 16 semaines (Mphahlele et *al.*, 2016). Pour prolonger la durée de conservation des arilles, différents procédés de séchage ont été appliqués (séchage traditionnel, convectif et infrarouge). Le but principal du séchage est de réduire la teneur en eau

pour éviter la détérioration due à des facteurs microbiens, physiques et chimiques tout en conservant sa qualité sensorielle et nutritionnelle (**Malekjani et Jafari, 2018**). Traditionnellement, les fruits et les légumes sont séchés en plein soleil. Cependant, le séchage au soleil dépend des conditions météorologiques et affecte l'homogénéité et la qualité du produit final. De plus, les produits sont sujets à la contamination microbienne (**Doymaz, 2011**).

Le séchage est un processus complexe de transfert de chaleur et de masse pour éliminer l'humidité des matières alimentaires. Il existe des nombreuses méthodes de séchage des aliments, chacune ayant ses propres avantages et inconvénients. Cela a donné lieu à une variété des séchoirs utilisant différents modes de chauffage, qui peuvent fonctionner aux différentes températures et pressions pour tenir compte des différences dans les attributs physiques du produit et pour atteindre les qualités souhaitées du produit séché (**Sabarez, 2016**). Plus de 85% des séchoirs industriels utilisent une méthode convective, c'est-à-dire que l'air chaud est utilisé pour fournir de la chaleur pour l'évaporation de l'eau et pour évacuer l'humidité évaporée du produit. Cette méthode de séchage est la plus couramment utilisée à l'échelle industrielle car elle est simple et facile à utiliser avec des coûts d'investissement relativement faibles (**Sabarez, 2016; Raghavi et al., 2018**). Néanmoins, cette méthode présente plusieurs inconvénients tels que la dégradation des composés et les changements de la saveur et de la couleur qui sont dus aux températures élevées utilisées (**Pu et Sun, 2017**). Pour surmonter cet important problème, le séchage par micro-ondes a été proposé, car il diminue le temps et la consommation d'énergie (**Jia et al., 2019**).

La technologie de séchage par micro-ondes est basée sur l'utilisation d'ondes électromagnétiques pour chauffer les matériaux alimentaires. Le séchage des aliments par micro-ondes, similaire à la lyophilisation, conduit à des produits de haute qualité avec un meilleur arôme, une valeur nutritionnelle, une couleur et une réhydratation est plus rapide par rapport aux produits séchés obtenus par séchage conventionnel (**Lenaerts et al., 2018**). Cette méthode pourrait être combinée à l'air chaud, au vide et à la lyophilisation pour améliorer la qualité des fruits secs (**Li et al., 2011; Pu et al., 2016**).

L'un des principaux objectifs de la technologie alimentaire moderne est la conservation des nutriments pendant le séchage des produits alimentaires, ce qui a conduit à l'utilisation des prétraitements pour améliorer le processus de séchage et par la suite à des produits de haute qualité (**Fonteles et al., 2016**).

Des exemples de telles méthodes sont les traitements non thermiques comme la haute pression hydrostatique (HPH), le champ électrique pulsé (CEP), les champs magnétiques oscillants (OMF), les ultrasons. Il a été démontré que ces méthodes inactivent efficacement les micro-organismes, prolongeant ainsi la durée de conservation du produit, tout en conservant

des aspects importants de leur fraîcheur, tels que la qualité physique, nutritionnelle et sensorielle (**Wang et al., 2018**).

Dans le traitement CEP, les aliments sont placés entre deux électrodes et soumis à des champs électriques pulsés à haute tension (E de 0,5-5kV/cm) pendant une courte période (μ s à ms), ce qui provoque une dégradation de la membrane cellulaire (**Parniakov et al., 2015**). Ce phénomène est connu sous le nom d'électro-perméabilisation et il se traduit par une amélioration du transfert de masse et de chaleur à travers la membrane cellulaire (**Bazhal et al., 2003; Parniakov et al., 2016; Ostermeier et al., 2018**), facilitant ainsi la déshydratation des différents fruits et légumes (**Parniakov et al., 2015; Vorobiev et Lebovka, 2008; Vorobiev et Lebovka, 2011; Wang et al., 2018**).

L'amélioration du séchage des différents systèmes alimentaires induite par le prétraitement du CEP a été étudiée par des nombreux chercheurs (**Lebovka et al., 2007; Parniakov et al., 2016; Liu et al., 2018; Ostermeier et al., 2018**). Bien que des nombreuses études aient été réalisées sur le séchage des arilles de la grenade par différentes méthodes (**Opara et al., 2009; Doymz, 2011; Bchir et al., 2012, Calín-Sánchez, 2012; Horuz et Maskan; 2013; Dak et al., 2014**), Il n'y a aucune étude sur l'effet du prétraitement au CEP sur la cinétique de séchage par micro-ondes assisté à l'air chaud des arilles de la grenade ont été rapportées.

Les objectifs du présent travail sont d'étudier les effets du prétraitement CEP sur le séchage par micro-ondes assisté à l'air chaud des arilles de la grenade en ce qui concerne la cinétique du séchage, la qualité physico-chimique et nutritionnelle des arilles de la grenade et le meilleur modèle mathématique pour prédire la cinétique du séchage.

2. Matériels et méthodes

2.1. Produit

Des fruits frais de la grenade (*P. granatum* L. doux-acide) ont été obtenus en automne dans la ville d'Ain Touta (Batna, Algérie). Les fruits ont été récoltés à pleine maturité avec les caractéristiques suivantes: pH $3,56 \pm 0,06$ et $15 \pm 0,09^\circ$ Brix. Ils ont été conservés au réfrigérateur à $4 \pm 1^\circ$ C jusqu'à leur utilisation. Avant les processus de séchage, la grenade a été lavée et coupée et les arilles ont été séparés manuellement. Les arilles blessés ont été retirés et jetés.

2.2. Prétraitement par champ électrique pulsé (CEP)

Le prétraitement du CEP a été effectué à l'aide d'un système développé au laboratoire sciences des aliments, Département de génie des bioressources, Université McGill, Canada. Le système CEP consistait en une alimentation haute tension 0-140 kV, un condensateur

suralimenté de $1 \mu\text{F}$ qui était déchargé à une fréquence d'impulsion de 10 Hz (figure 42). Différents nombres d'impulsions ont été appliqués avec une forme exponentielle décroissance et une durée de 700 μs . La surveillance en ligne a été effectuée avec un oscilloscope numérique (Tektronix TDS2024C 200 MHz, USA).

Les échantillons ont été traités dans une chambre de traitement statique composée de deux électrodes parallèles en acier inoxydable. Les tensions pulsées appliquées étaient de 2, 3 et 4 kV, résultant des champs électriques de 0,5, 1 et 1,5 kV/cm, respectivement. La température a été mesurée en ligne avant et après chaque traitement à l'aide d'un thermocouple (Extech, TM 300, Chine). La température de traitement n'a pas dépassé $30 \pm 2^\circ\text{C}$.

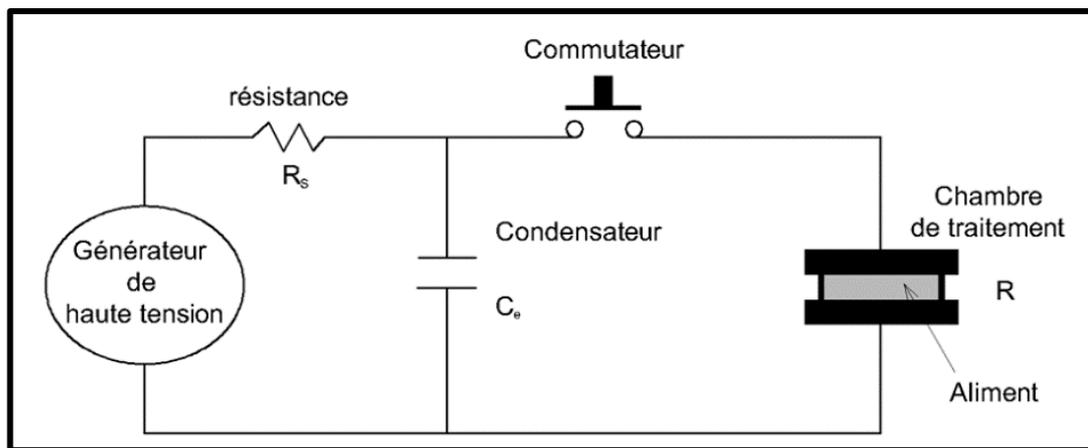


Figure 42: Schéma d'installation de CEP.

2.3. Méthodes de séchage

La teneur en humidité initiale (M_0) des arilles était de $80,27 \pm 0,2\%$ (wb). Elle a été déterminée par séchage dans une étuve à vide à 70°C pendant 24 heures selon la méthode de l'Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 1990).

2.3.1. Séchage par micro-ondes assisté à l'air chaud

Le séchage des arilles de la grenade (environ 30 g) a été effectué au laboratoire de génie post-récolte, Département de génie des bioressources, Université McGill, Canada. Le séchage a été effectué dans un micro-ondes assisté à l'air chaud (figure 43). Le générateur des micro-ondes fonctionnait à 2,45 GHz avec une puissance allant de 0 à 100 W. Deux détecteurs à cristaux (Hewlett Packard Model 420A Detectors, Californie, États-Unis), surveillaient l'incident et la puissance réfléchi. La température des arilles a été mesurée à l'aide d'une sonde à fibre optique (série Nortech EMI-TS, Québec, Canada). Les températures de l'air d'entrée et de sortie ont été mesurées à l'extérieur de la cavité à l'aide d'un thermocouple de type T. La masse de l'échantillon pendant son séchage a été mesurée en utilisant une cellule de charge (signal de

conditionneur Imperial Instruments TM-2, II, USA). Tous les capteurs étaient connectés à une unité d'acquisition/commutation de données (Agilent 34970A, CA, USA) et étaient surveillés par un ordinateur. Les programmes d'acquisition et de contrôle ont été écrits à l'aide d'Agilent VEE Pro Ver 8.0 (CA, USA). L'air chaud contrôlé par PID fournit de l'air chaud à la cavité micro-ondes. Le séchage a été réalisé aux trois températures différentes (50, 60 et 70°C), avec une puissance de 100 W.

Les arilles de la grenade ont été placés dans un récipient cylindrique en plastique de 30 cm³. Pour éviter une surchauffe localisée dans les arilles, le récipient a été tourné et un ventilateur électrique a été installé au bas du séchoir pour produire un courant d'air. Le processus du séchage a été arrêté lorsque la teneur en humidité de l'échantillon était stable. Après refroidissement, les arilles de la grenade séchés ont été emballés sous vide dans un sac en polyéthylène.

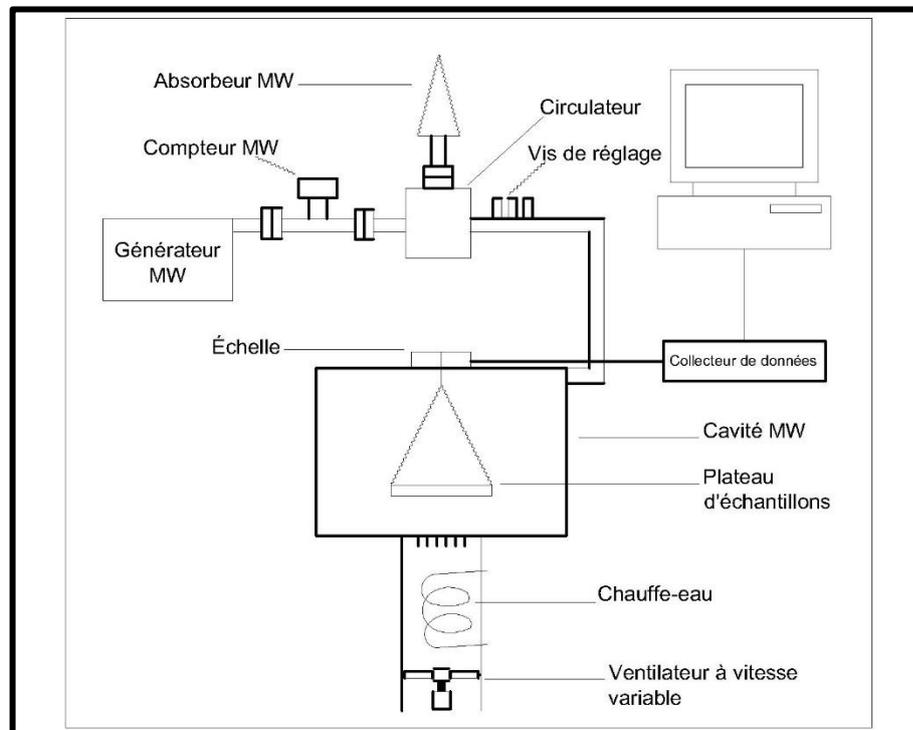


Figure 43: Installation de séchage par micro-ondes assisté à l'air chaud.

2.4. Modélisation mathématique du processus de séchage

2.4.1. Cinétique de séchage

Le taux d'humidité (MR) des arilles de la grenade a été calculé à l'aide de l'Eq. (32):

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (32)$$

Où: M_t et M_0 sont les teneurs en humidité (kg d'eau/kg dm) au temps "t" et au temps "0", respectivement, M_e est l'humidité à l'équilibre (kg d'eau/kg dm).

Différents modèles de cinétique de séchage ont été utilisés pour décrire le séchage de la grenade (tableau 19). L'analyse de régression non linéaire a été réalisée à l'aide du logiciel Sigma Plot\SPW11 (version 11, 2008, USA) pour ajuster les données expérimentales des modèles d'équation sélectionnés. Une analyse statistique a été utilisée pour évaluer l'ajustement des données expérimentales aux différents modèles, R^2 (coefficient de détermination), réduction du chi carré (χ^2) et de l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Ces paramètres ont été calculés à l'aide des équations ci-dessous:

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{ei} - MR_{pi})^2}{N - Z} \quad (33)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{ei} - MR_{pi})^2} \quad (34)$$

Où: M_{Rei} est le taux d'humidité expérimental, M_{Rpi} est le taux d'humidité prévu, N est le nombre d'observations et Z est le nombre des constants dans un modèle.

Tableau 19: Modèles mathématiques utilisés pour décrire le taux d'humidité de la courbe de séchage en couche mince.

No.	Nom du modèle	Equation	Reference
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$	Bruce, (1985)
2	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Hashim et al., (2014)
3	Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Midilli et al., (2002)
4	Two-term	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(k_1t)$	Sacilik, (2007)
5	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	Togrul et Pehlivan, (2002)
6	Modified Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	Zenoozian et al., (2008)
7	Wang and Singh	$MR = 1 + a + bt^2$	Wang et Singh, (1978)

2.4.2. Détermination de la diffusion efficace de l'humidité (D_{eff})

La diffusivité effective a été calculée sur la base de la deuxième loi de Fick de l'équation de diffusion (Eq. 35):

$$\frac{\delta M}{\delta t} = D_{eff} \nabla^2 M \quad (35)$$

La solution analytique de l'Eq. (35) pour la migration d'humidité par diffusion dans un objet sphérique à température constante pendant le processus de séchage est donnée par:

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{L^2} t\right) \quad (36)$$

Où: D_{eff} est la diffusivité effective de l'humidité (m^2/s), t est le temps de traitement (s), L est la demi-épaisseur de l'échantillon (m).

Pour des périodes de séchage plus longues, l'Eq.(37) a été utilisée:

$$\ln MR = \ln \frac{6}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff}}{L^2} t \quad (37)$$

La diffusivité effective a été obtenue en traçant les données expérimentales de séchage exprimées en termes de $\ln(MR)$ en fonction du temps, où la pente de la courbe "K" est calculée par l'Eq. (38):

$$K = \frac{\pi^2 D_{eff}}{R^2} \quad (38)$$

2.4.3. Calcul de l'énergie d'activation

La dépendance à la diffusivité de l'humidité effective et de la température est décrite par l'équation d'Arrhenius (Eq. 39):

$$D_{eff} = D_0 e^{\frac{E_a}{R(T+273,15)}} \quad (39)$$

Où: D_0 est le facteur pré-exponentiel d'Arrhenius (m^2/s), E_a (kJ/mol) est l'énergie d'activation, R est la constante de gaz universelle 8,31 (kJ/mol·K) et T (°C) est la température.

2.5. Propriétés physiques et chimiques des arilles séchés

2.5.1. Analyse de la couleur

La couleur des échantillons séchés a été mesurée en utilisant un chromomètre (Minolta, CR-300X, Japon). La couleur est déterminée par L^* , a^* et b^* des paramètres CIE. La variation de la couleur (ΔE) a été calculée en utilisant l'Eq. (40):

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (40)$$

L^* , a^* et b^* indiquent respectivement la légèreté, la rougeur-verdure et le jaunissement-bleuissement. ΔE indique le degré de changement de la couleur global d'un échantillon par rapport à la valeur de couleur d'un échantillon idéal. Les arilles de la grenade fraîches avaient des valeurs L^* , a^* et b^* de $32,27 \pm 1,5$, $21,41 \pm 1,3$ et $7,80 \pm 2,6$, respectivement.

2.5.4. Analyse de la texture

La dureté des arilles a été déterminée en utilisant un analyseur de texture (Instron 4502, USA) avec une sonde à plaque de compression de 100 mm. L'analyseur de la texture était relié

à un ordinateur qui enregistrait et analysait les données via un logiciel. Les conditions de fonctionnement de l'instrument étaient les suivantes: vitesse de pré-test de 1,5 mm/s, vitesse de test de 0,5 mm/s, vitesse de post-test de 10,0 mm/s, force de déclenchement était de 0,10 N. La dureté a été mesurée sur cinq différents échantillons.

2.5.5. Phénoliques totaux

La procédure d'extraction modifiée de **Süfer et Palazoğlu, (2019)**; a été utilisée dans cette étude. Un gramme d'échantillon des arilles séchés broyés a été mélangé avec 10 ml de méthanol à 80%. Le mélange a ensuite été vortexé pendant 15s, traité aux ultrasons pendant 20 min à 25°C (Fisher Scientific FS30, Mexique) et centrifugé pendant 15 min (Sigma 4-5L, Allemagne). Les surnageants ont été filtrés et stockés à 4°C jusqu'à l'analyse spectrophotométrique. Une solution de méthanol (80%) a été utilisée comme blanc dans toutes les analyses chimiques, et chaque essai a été effectué en triple.

La méthode Folin-Ciocalteu mentionnée par **Süfer et Palazoğlu, (2019)** a été utilisée pour déterminer la teneur totale en phénol des arilles de la grenade. La procédure a consisté à mélanger 0,5 ml d'extrait avec 0,5 ml de réactif Folin-Ciocalteu; auquel 3 ml de Na₂CO₃ à 10% ont été ajoutés. Le mélange a ensuite été placé dans l'obscurité pendant 30 minutes. L'absorbance a été mesurée à une longueur d'onde de 760 nm en utilisant un spectrophotomètre (Shimadzu, UV 1800, Japon). Les résultats ont été exprimés en mg GAE (équivalent d'acide gallique)/kg de matière sèche.

2.5.6. Capacité antioxydante

Les activités d'élimination des radicaux libres ont été évaluées en utilisant la méthode des radicaux 2,2 diphényl-1-picrylhydrazyle (DPPH) décrite par **Calín-Sánchez et al., (2012)**. Pour chaque échantillon, 2 g d'arilles séchés ont été homogénéisés dans 5 ml de MeOH/eau (80:20 v/v) puis centrifugées à 15 000 tr/min pendant 20 min. Dix µl du surnageant ont été mélangés avec 40 µl de MeOH et ajoutés à 950 µl d'une solution de DPPH 0,094 mM. Après incubation pendant 50 min dans un endroit sombre, les absorbances ont été mesurées à une longueur d'onde de 515 nm à l'aide d'un spectrophotomètre (Shimadzu, UV 1800, Japon). Les résultats ont été exprimés en mg d'équivalent Trolox/g de Ms.

2.6. Analyses statistiques

L'analyse de variance (ANOVA) a été réalisée en utilisant les procédures General Linear Models (GLM) du logiciel SigmaPlot\SPW11 (version 11, 2008, USA). Les expériences ont été effectuées en triple et les moyennes des trois ensembles de données ont été utilisées. Les

moyennes ont été séparées par la différence la moins significative selon le test à pages multiples de Duncan.

3. Résultats et discussion

3.1. Comportement au séchage des arilles de la grenade

3.1.1. Taux d'humidité et taux de séchage

Le séchage des tissus végétaux dépend de plusieurs facteurs liés à la matière alimentaire (composition, propriétés et structure de la surface) et aux conditions du séchage (température, vitesse de l'air, humidité et pression), qui peuvent affecter le processus de transfert de chaleur et de masse dans le matériel végétal (**Huang et al., 2019**).

La cinétique du séchage par micro-ondes assisté à l'air chaud des arilles de la grenade traités et non traités par CEP en fonction de l'intensité du champ, du temps et de la température est illustrée à la figure 42. Le prétraitement des arilles avec du CEP a amélioré le taux de séchage de manière significative ($P < 0,05$) par rapport aux arilles non traités. La teneur en humidité des arilles de la grenade était inversement proportionnelle à la température du séchage et à l'intensité des champs électriques et a diminué de façon exponentielle au fil du temps.

Trois stades différents (I, II et III) ont été observés sur la figure 44. Au cours du stade I, la température à l'intérieur de l'échantillon est restée sensiblement constante pendant une courte période. La température minimale dans l'échantillon à ce stade était essentiellement la même pour les arilles traités avec CEP. Au stade II, la température à l'intérieur de l'échantillon a atteint le plus haut avec une durée de traitement relativement plus courte. Cela pourrait être associé à l'évaporation de l'eau libre. Par conséquent, **Liu et al., (2018)** ont rapporté que l'étape III correspondait à l'évaporation des différentes formes d'eau (eau liée et eau libre). Cependant, en dessous d'un certain point critique (environ $w_a \leq 0,5$), la diminution du taux de séchage s'est finalement stabilisée, ce qui correspond au stade III.

Dans tous les échantillons traités au CEP, une diminution plus élevée de la MR par rapport aux échantillons non traités à la même température de traitement a été observée. Cela pourrait être dû au prétraitement CEP qui améliore les dommages à la membrane cellulaire et accélère par conséquent le transfert de chaleur et de masse (chapitre 4). Par conséquent, si la perméabilisation des membranes augmente, cela conduit à des taux de mouvement de l'eau plus élevés conduisant à des taux de séchage plus élevés (**Huang et al., 2019**). Les molécules d'eau auront plus de mobilité à travers les pores et un temps plus court pour atteindre les tissus de surface à travers les capillaires et ainsi le taux de séchage sera amélioré (**Chauhan et Kumar, 2018**).

En outre, il existe une différence significative dans le comportement de séchage pour les échantillons traités à différente intensité du champ électrique (0,5, 1 et 1,5/cm). L'augmentation de l'intensité du champ électrique de 0,5 à 1,5 kV/cm a entraîné une diminution rapide du taux d'humidité (MR) quelle que soit la température (50, 60 et 70°C).

La température (50, 60 et 70°C) utilisée au moment du traitement a également eu un grand impact sur les taux de séchage. **Doymaz, (2012)**; ont rapporté que la teneur en humidité (MR) diminuait rapidement à mesure que la température augmentait de 50 à 70°C, entraînant une amélioration de l'activité des molécules d'eau.

Le temps de séchage variait de 65 à 190 min pour les arilles prétraités avec du CEP, tandis que pour les arilles non traités, le temps de séchage variait de 90 à 250 min. Le temps de séchage le plus long (250±5 min) a été obtenu pour les arilles non traités séchés à 50°C. Cela était trois fois plus long que celui requis pour sécher les arilles traités (85±5 min). Le temps du séchage le plus court (65±5 min) a été observé pour les arilles prétraités avec CEP en utilisant une intensité du champ de 1,5 kV/cm à 70°C. Dans ce cas, le temps de séchage était quatre fois plus rapide que pour un produit non traité. Le prétraitement au CEP réduit le temps du séchage de 64, 51,72 et 27,78% à 50, 60 et 70°C, respectivement.

On peut dire que la différence entre les temps de séchage pour les échantillons non traités et les échantillons prétraités au CEP augmentait avec la diminution des températures du séchage. Il convient également de noter que des effets significatifs du CEP sur le processus de séchage n'ont été observés qu'à des températures modérées ($T < 60^\circ\text{C}$). Ainsi, à des températures plus élevées, le traitement au CEP n'a eu pratiquement aucun effet bénéfique sur le taux de séchage (**Lebovka et al., 2007**). Cela peut s'expliquer par le masquage de l'électroporation par les effets de la plasmolyse thermique lors d'un séchage à long terme à des températures supérieures à 60°C (**Liu et al., 2018**). Ces résultats sont corroborés par ceux rapportés par **Liu et al., (2018)**.

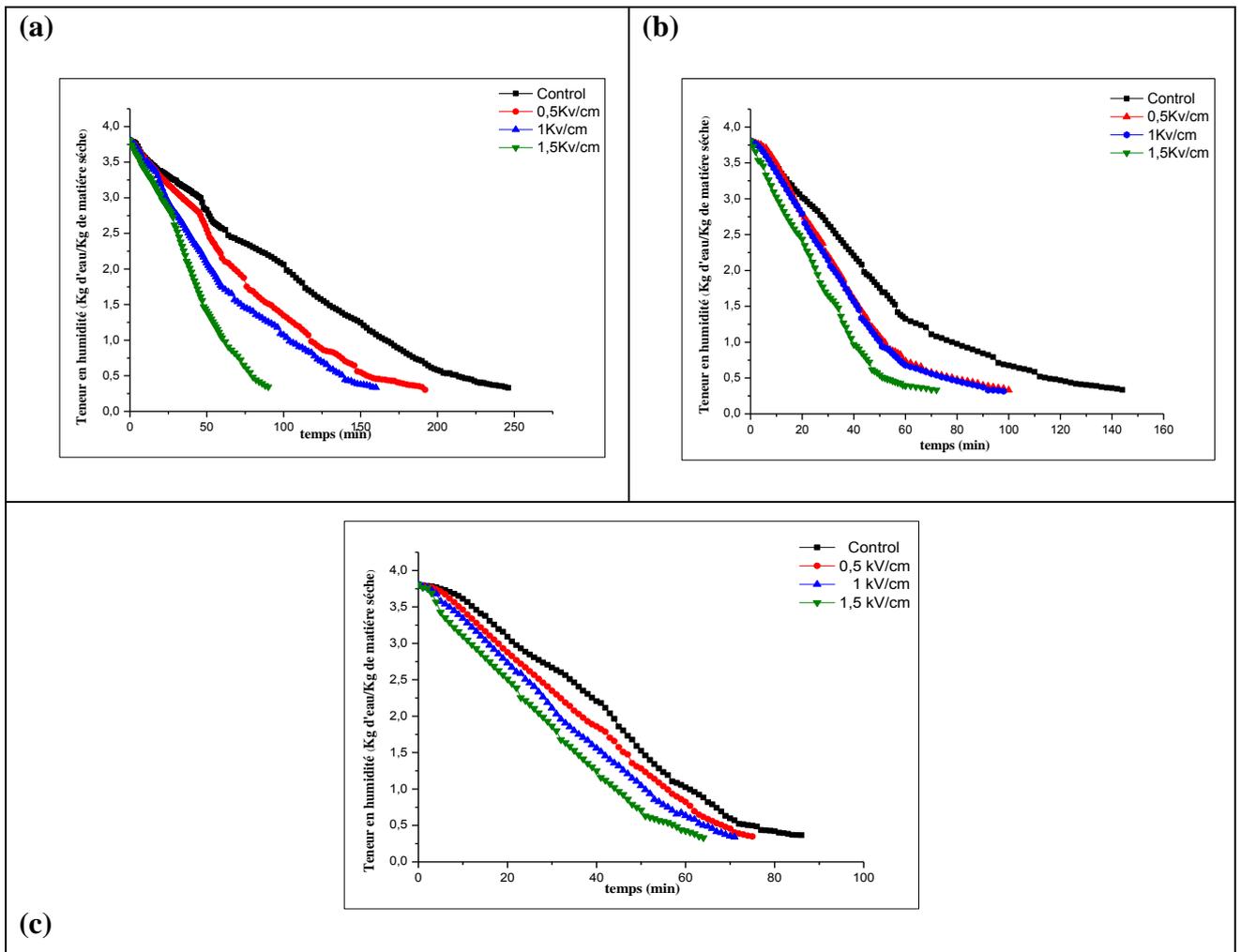


Figure 44: Influence de l'intensité du champ électrique et de la température sur la teneur en humidité des arilles de la grenade a) 50°C, b) 60°C et c) à 70°C

3.1.2 Évaluation des modèles de séchage

La teneur en humidité par rapport aux données du temps de traitement de séchage a été utilisée pour normaliser les courbes de séchage (figure 44). Le taux d'humidité (MR) a été calculé en utilisant l'Eq. (32) dans différentes conditions du séchage et a été modélisé sur sept modèles de séchage en couche mince sélectionnés. Ces modèles ont été évalués à l'aide des outils statistiques: le coefficient de détermination (R^2), le chi carré (χ^2) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Les résultats des sept modèles pour différentes températures de séchage de 50, 60 et 70°C et aux différentes intensités du champ sont présentés dans le tableau 20.

Tableau 20: Qualité d'adaptation des modèles par séchage à l'air chaud assisté par micro-ondes aux différentes températures avec différents traitements CEP.

A. 50°C		Coefficients	Témoin	0.5 kV/cm	1 kV/cm	1.5 kV/cm
N° du model						
1	R²	0,986	0,9835	0,9926	0,9664	
	χ²	0,0024	0,0030	0,0011	0,0052	
	RMSE	0,0493	0,0545	0,0343	0,0717	
2	R²	0,9903	0,9907	0,9968	0,9779	
	χ²	0,0017	0,0017	0,0005	0,0034	
	RMSE	0,0410	0,0411	0,0224	0,0583	
3	R²	0,9988	0,997	0,9987	0,9942	
	χ²	0,0002	0,0005	0,0002	0,0009	
	RMSE	0,0145	0,0232	0,0147	0,0301	
4	R²	0,9903	0,9907	0,9968	0,9779	
	χ²	0,0017	0,0017	0,0005	0,0035	
	RMSE	0,0410	0,0411	0,0224	0,0583	
5	R²	0,9988	0,997	0,9987	0,9942	
	X²	0,0002	0,0005	0,0002	0,0009	
	RMSE	0,0145	0,0232	0,0147	0,0301	
6	R²	0,9903	0,9907	0,9968	0,9779	
	χ²	0,0017	0,0017	0,0005	0,0036	
	RMSE	0,0410	0,0411	0,0224	0,0583	
7	R²	0,999	0,998	0,9983	0,9946	
	X²	0,0002	0,0003	0,0002	0,0008	
	RMSE	0,0140	0,0192	0,0165	0,0290	
B. 60°C		Coefficients	Témoin	0.5 kV/cm	1 kV/cm	1.5 kV/cm
1	R²	0,9897	0,9752	0,979	0,9807	
	χ²	0,0017	0,0045	0,0037	0,0032	
	RMSE	0,0418	0,0672	0,0609	0,0563	
2	R²	0,9954	0,9892	0,9899	0,9868	
	χ²	0,0007	0,0020	0,0018	0,0022	
	RMSE	0,0279	0,0445	0,0424	0,0466	
3	R²	0,9965	0,9923	0,9932	0,9944	
	χ²	0,0006	0,0014	0,0012	0,0009	
	RMSE	0,0243	0,0376	0,0348	0,0306	
4	R²	0,9954	0,9892	0,9899	0,9868	
	χ²	0,0008	0,0020	0,0018	0,0023	
	RMSE	0,0279	0,0445	0,0424	0,0470	
5	R²	0,9965	0,9923	0,9932	0,9944	
	X²	0,0006	0,0015	0,0012	0,0010	
	RMSE	0,0243	0,0376	0,0348	0,0306	
6	R²	0,9954	0,9892	0,9899	0,9868	
	χ²	0,0008	0,0021	0,0019	0,0024	
	RMSE	0,0279	0,0445	0,0424	0,0470	
7	R²	0,9981	0,9961	0,9968	0,9967	
	X²	0,0003	0,0033	0,0036	0,0082	
	RMSE	0,0179	0,0572	0,0591	0,0889	

C. 70°C	Coefficients	Témoin	0.5 kV/cm	1 kV/cm	1.5 kV/cm
1	R ²	0,9639	0,9705	0,9749	0,9789
	χ ²	0,0068	0,0049	0,0041	0,0033
	RMSE	0,0823	0,0702	0,0643	0,0578
2	R ²	0,9816	0,9849	0,9864	0,9863
	χ ²	0,0035	0,0026	0,0023	0,0022
	RMSE	0,0589	0,0504	0,0474	0,0467
3	R ²	0,9896	0,9955	0,9959	0,9979
	χ ²	0,0020	0,0007	0,0007	0,0003
	RMSE	0,0444	0,0276	0,0263	0,0185
4	R ²	0,9816	0,9849	0,9864	0,9863
	χ ²	0,0036	0,0026	0,0023	0,0023
	RMSE	0,0589	0,0504	0,0474	0,0467
5	R ²	0,9896	0,9955	0,9959	0,9963
	X ²	0,0020	0,0008	0,0007	0,0003
	RMSE	0,0444	0,0276	0,0263	0,0185
6	R ²	0,9816	0,9849	0,9864	0,9863
	χ ²	0,0037	0,0027	0,0024	0,0024
	RMSE	0,0589	0,0504	0,0474	0,0467
7	R ²	0,9924	0,9966	0,9971	0,9983
	X ²	0,0015	0,0006	0,0030	0,0002
	RMSE	0,0381	0,0240	0,0544	0,0167

En général, les valeurs R², χ² et RMSE pour les modèles se situaient entre 0,9664 et 0,9998, 0,0002 et 0,001, 0,014 et 0,0717 respectivement sur toute la plage des températures.

Le tableau 21 montre que les valeurs les plus élevées de R² ainsi que les valeurs les plus faibles de χ² et de RMSE pour les diverses conditions de séchage ont été obtenues à partir du modèle de séchage logistique logarithmique et modifié de Midilli et *al.*, (2002). Ces modèles ont donc été sélectionnés pour prédire le comportement des arilles de la grenade lors du séchage par micro-ondes assisté à l'air chaud. De plus, ces modèles ont donné des résultats similaires avec d'autres cultures et sous-produits agricoles (Alara et *al.*, 2019).

3.1.3 Diffusivité efficace de l'humidité (D_{eff})

Afin de calculer la diffusivité de l'humidité dans les arilles l'Eq. (37) a été utilisée. Le coefficient de détermination (R²) variait de 0,96 à 0,99 (figure 45). Les diffusivités d'humidité des échantillons traités au CEP sont représentées sur la figure 45. Elles variaient de 2,46×10⁻⁸ à 8,25×10⁻⁸m²/s. Les arilles non traités avaient des coefficients de D_{eff} allant de 1,8×10⁻⁹ à 5,44×10⁻⁹m²/s. Ces valeurs corroborent celles rapportées par Adedeji et *al.*, (2008).

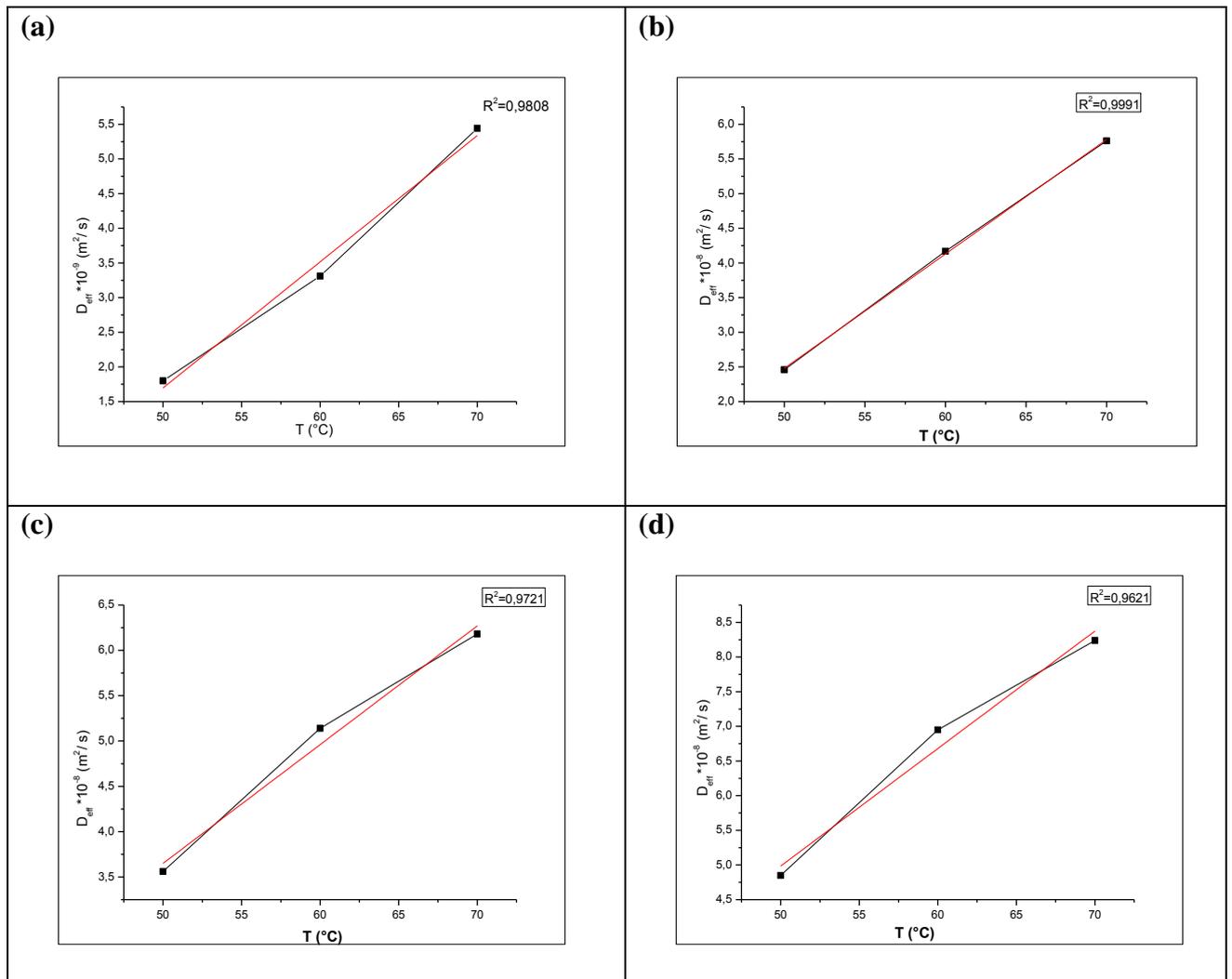


Figure 45: Diffusivité effective lors du séchage par micro-ondes en fonction de l'intensité du champ électrique: a) non traités, b) prétraités à 0,5KV/cm, c) prétraités à 1KV/cm et d) prétraité à 1.5KV/cm.

Les résultats ont montré que la température et le prétraitement avaient un effet significatif ($p < 0,05$) sur la valeur de D_{eff} . Le traitement CEP a entraîné une augmentation de D_{eff} . Les valeurs de D_{eff} les plus élevées ont été obtenues lorsqu'une intensité du champ électrique plus élevée de 1,5 kV/cm a été appliquée. Cela s'est également reflété dans les résultats des tests de rupture des cellules (Z) (figure 33) qui ont montré un effet de désintégration croissant avec une intensité de champ croissante (1,5KV/cm). On peut supposer que la formation des pores dans la membrane cellulaire augmente avec l'augmentation du niveau de traitement. Par conséquent, la libération d'humidité à l'extérieur de l'espace intercellulaire sera facilitée par la rupture de la membrane (Ostermeier et al., 2018). Lebovka et al., (2007); ont également montré une augmentation du coefficient de diffusion des tissus de la pomme de terre pendant le séchage après le prétraitement du CEP.

De plus, il a été démontré que D_{eff} augmente avec l'augmentation de la température. Cela est probablement dû à l'effet de la température sur le transfert de masse et donc à une diffusion plus rapide de l'humidité hors de l'échantillon (**Doymaz, 2012**).

Des tendances similaires ont également été observées par **Ostermeier et al., (2018)**; dans le séchage par convection des oignons et par **Gachovska et al., (2008)**; pour les carottes avec un séchage par micro-ondes assisté par CEP. Les résultats obtenus dans nos travaux sont supérieurs à ceux obtenus par **Doymaz (2012)** et **Süfer et Palazoğlu (2019)** pour le séchage des arilles de la grenade séchés par séchage par convection.

3.1.4. Energie d'activation (E_a)

Les valeurs de l'énergie d'activation (E_a) des arilles de la grenade subissant un séchage par micro-ondes assisté à l'air chaud ont été déterminées à partir de la pente de D_{eff} par rapport à la température absolue. Pour toutes les conditions expérimentales, les valeurs d' E_a varient entre 26,65 et 35,75 kJ/mol. Les valeurs d'énergie d'activation sont cohérentes avec celles rapportées dans la littérature qui varient de 12,7 à 110 kJ/mol (**Omolola et al., 2019**).

L'énergie d'activation des arilles non traités était supérieure à celle des arilles traités au CEP. Pour les échantillons non traités, la valeur E_a était de 35,95 kJ/mol, tandis que pour les échantillons traités l' E_a est de 26,65 kJ/mol. Cela est probablement dû à la destruction des membranes cellulaires (électroporation) qui a entraîné une augmentation du transfert de masse et de chaleur (**Younis et al., 2018**).

Les énergies d'activation obtenues dans cette étude étaient inférieures aux énergies d'activation rapportées par **Süfer et Palazoğlu, (2019)** et **Doymaz, (2012)**.

3.2. Propriétés physiques et chimiques des arilles séchés

3.2.1. Couleur des arilles séchés

La couleur des aliments est importante pour les consommateurs pour évaluer la qualité. En règle générale, l'opération de séchage modifie les caractéristiques de la surface des aliments et modifie donc leur couleur (**Omolola et al., 2019**).

La couleur des arilles de la grenade séchés a été déterminée en utilisant un colorimètre (Minolta, CR-300X, Japon). Les couleurs ont été mesurées comme L^* , a^* et b^* représentant respectivement la légèreté, la rougeur et le jaunissement. Les données de la couleur pour les arilles de la grenade séchés sont présentées dans le tableau 21.

La couleur variait avec les températures du séchage et l'intensité du champ. Il a été observé que la couleur des arilles séchés était beaucoup plus foncée par rapport à la couleur des arilles frais et par conséquent, les valeurs a^* et b^* pour les arilles secs étaient plus élevées que pour

les arilles brutes. Pendant le séchage, la couleur du matériel végétal change. Le changement de la couleur des arilles était dû à la chaleur et à l'oxydation pendant le séchage et à l'activité résiduelle de la polyphénoloxydase qui provoque le brunissement pendant le processus du séchage. Ces changements sont liés à la dégradation des composés colorés naturels tels que les anthocyanes rouges dans les arilles de la grenade. De plus, le séchage à long terme entraîne la perte des substances solubles (composés anthocyaniques) (Omolola *et al.*, 2019). Cependant, les arilles non traités séchés étaient significativement plus foncés et présentaient une rougeur plus intense (a^*) par rapport aux échantillons prétraités.

Dans cette étude, les arilles prétraités par CEP qui ont été séchés par micro-ondes assisté à l'air chaud à 50°C avaient la meilleure couleur. De plus, le changement de la couleur (ΔE) était significativement inférieur à 50°C par rapport à 60 et 70°C. Les résultats obtenus étaient en accord avec ceux obtenus par Dev *et al.*, (2008) pour les raisins séchés à l'aide d'une méthode micro-ondes assisté par CEP.

Tableau 21: Couleur et la dureté des arilles séchés.

Température (°C)	Intensité du champ (kV/cm)	L*	a*	b*	ΔE	Hardness/ N
50	Control	28.85± 1.86	23.14± 3.80	9.59± 2.48	4.37 ± 2.3	27.77 ± 3.09
	0.5	29.25± 2.41	23.03± 1.09	10.18± 0.81	3.60± 2.6	29.90± 6.36
	1	28.52± 2.99	22.45± 2.06	10.80± 1.89	4.20± 1.2	31.92± 5.20
	1.5	29.44± 0.95	22.87± 1.34	10.41± 1.28	3.72± 1.12	35.90± 5.97
60	Control	27.14± 2.42	24.95± 2.6	10.68± 1.03	5.71± 2.4	30.60± 2.56
	0.5	27.04± 1.16	24.40± 3.05	10.62± 2.61	5.98± 0.9	32.24± 2.42
	1	27.16± 3.15	23.66± 1.23	10.95± 1.5	6.02± 1.8	33.94± 4.01
	1.5	26.26± 1.17	23.49± 1.93	10.86± 3.45	6.73±1.09	36.38± 3.45
70	Control	27,23± 2.98	24.39± 3.45	10.31± 1.95	5.03± 1.6	33.10± 3.80
	0.5	26.77± 1.81	25.27± 1.46	9.40 ± 1.40	6.37± 2.4	34.31± 2.99
	1	27.84± 2.0	24.59± 1.93	9.47± 2.16	5.20 ± 1.0	37.78± 5.60
	1.5	27.27± 2.31	24.55± 2.56	9.35± 1.01	5.75± 2.6	39.35± 4.81

3.2.2. Texture

L'une des caractéristiques texturales importantes des produits séchés à base des fruits est la dureté qui aide à définir les propriétés mécaniques des tissus des fruits (Süfer et Palazoğlu, 2019).

Les valeurs de la dureté mesurées pour les différents échantillons des arilles prétraités et non traités par CEP après séchage aux différentes températures sont présentées dans le tableau 21. Les résultats montrent que la température et le prétraitement CEP sont des paramètres importants pour la dureté. La dureté des arilles séchés variait de 27,77 à 39,35 N. Les

échantillons frais avaient une dureté de 19,35 N et le processus de séchage a augmenté le niveau de rigidité de près de quatre fois en raison de la perte d'adhérence cellulaire en raison de la déshydratation (**Süfer et Palazoğlu, 2019**).

Les échantillons séchés à des températures élevées avaient une texture plus dure, comme l'ont signalé plusieurs auteurs pour les arilles de la grenade (**Süfer et Palazoğlu, 2019; Dak et al., 2014; Dak et al., 2014**). Les arilles déshydratés à 70°C ont été les plus durs (39,35 N) en raison de la diffusion rapide de l'humidité dans un temps de séchage plus court. Des résultats similaires ont été rapportés par (**Süfer et Palazoğlu, 2019**) pour les arilles de la grenade séchés dans les mêmes conditions de la température.

3.2.3. Polyphénols totaux

Les fruits de la grenade sont connus comme des sources des nombreux composés bioactifs et des propriétés thérapeutiques en raison de leurs fortes concentrations en polyphénols et en vitamines (**Rajha et al., 2019**). Le traitement des produits végétaux dégrade souvent les composés bioactifs. Cela est lié à l'utilisation des températures élevées qui accélèrent la cinétique des réactions de dégradation (**Nowacka et al., 2019**).

La teneur en composés phénoliques totaux dans les arilles de la grenade séchés a été déterminée et les résultats sont présentés sur la figure 46.

La teneur totale en polyphénols variait de 2005,32 à 3350,28 mg GAE/kg MS. La concentration la plus élevée en composés phénoliques a été détectée dans les arilles séchés à 50°C et prétraités à 1,5 kV/cm, tandis que la teneur la plus faible a été trouvée dans les arilles non traités séchés à 70°C. Cela était probablement dû à la meilleure perméabilisation des structures intracellulaires causée par le traitement au CEP (**Nowacka et al., 2019**). Cependant, la teneur totale en phénols des arilles séchés traités au CEP a augmenté à 21,02% par rapport au tissu non traité séché. Ces résultats démontrent clairement l'influence du CEP et de la température sur les composés phénoliques.

Les résultats de cette étude sont en accord avec les rapports précédents qui suggéraient que la température exerçait une grande influence sur les composés phénoliques des arilles de la grenade séchés par différentes méthodes (**Süfer et Palazoğlu, 2019; Calín-Sánchez et al., 2012**). D'autre part; le CEP a exercé une grande influence sur l'augmentation des composés phénoliques dans différentes plantes séchées (**Lammerskitten et al., 2019**).

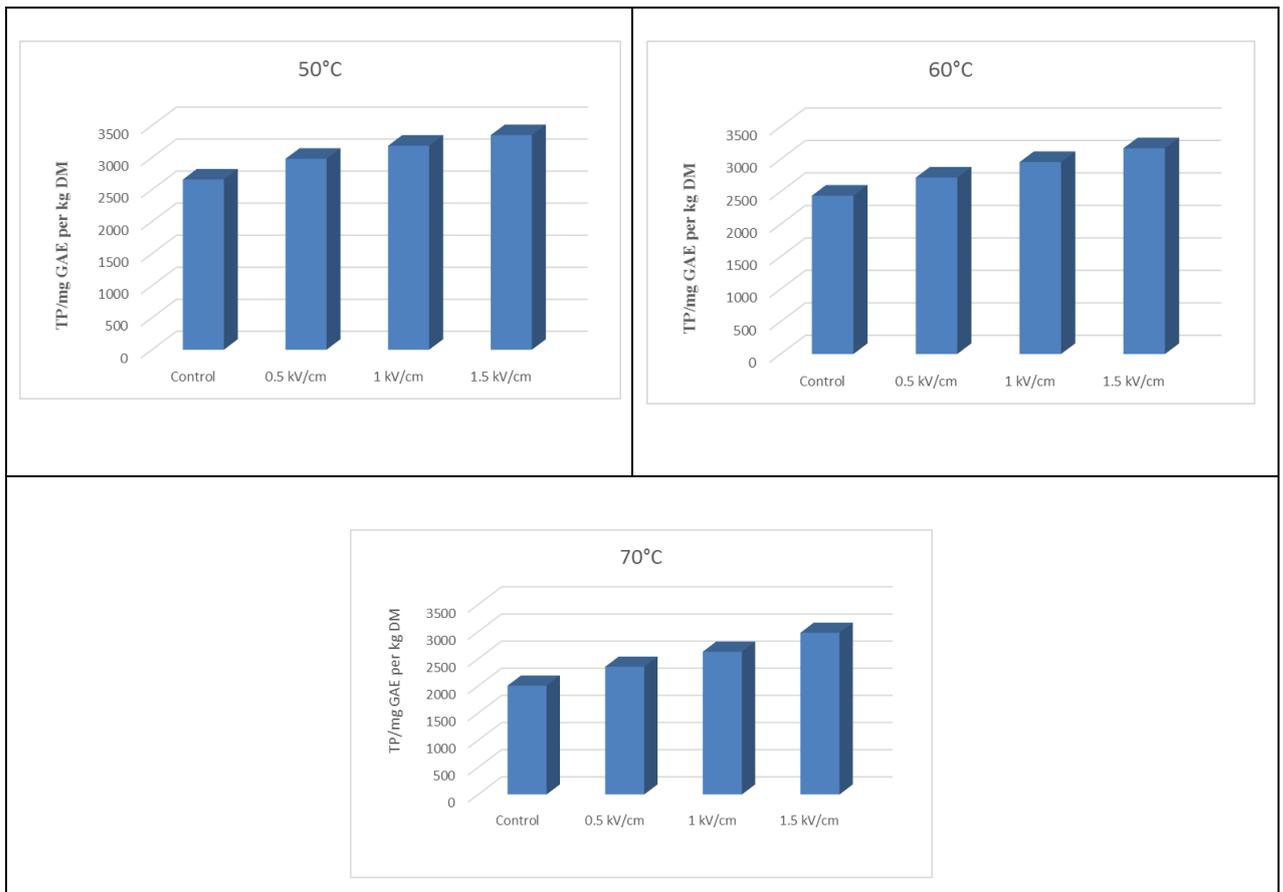


Figure 46: Teneur totale en phénols des arilles séchés par micro-onde aux différentes températures et prétraités avec différentes intensités du CEP.

3.2.4. Activité antioxydante

Le test de DPPH est une méthode largement utilisée pour évaluer la capacité antioxydante des extraits de différents matériaux végétaux. Le test radicalaire est que l'antioxydant réagit avec le radical libre stable 1,1-diphényl-2-picrylhydrazyle (couleur violet foncé) et le réduit en 1,1-diphényl-2-picrylhydrazine avec une couleur jaune. Le degré de décoloration indique le potentiel de piégeage de l'antioxydant de l'échantillon résultant en une diminution de l'absorbance à une longueur d'onde de 517 nm.

Dans cette étude, la température et le CEP ont montré une variabilité significative sur activité antioxydante (figure 46). Parmi les arilles séchés, l'activité antioxydante la plus élevée a été détectée dans les arilles séchés à 50°C et prétraités à 1,5 kV/cm (0,70 mg eq Trolox g⁻¹). En revanche, la plus faible activité a été détectée pour les arilles non traités séchés à 70°C (0,60 mg eq Trolox g⁻¹).

Des études antérieures ont également rapporté que les traitements au CEP conduisent à une activité antioxydante plus élevée que celle des échantillons témoins (Huang et al., 2019). Il a été démontré précédemment qu'une dégradation plus élevée de la structure cellulaire causée par

le CEP peut améliorer les propriétés antioxydantes des matériels végétaux (Nowacka et al., 2019).

Les résultats obtenus dans la présente étude sont en accord avec les résultats de Huang et al., (2019) qui ont montré que le CEP augmentait significativement l'activité antioxydante des abricots secs.

Le traitement thermique a induit une augmentation significative de la capacité antioxydante des arilles de la grenade avec la diminution de la température (de 70 à 50°C). Au contraire aux résultats qui ont été observés par (Süfer et Palazoğlu, 2019), qui ont rapporté que l'activité antioxydante totale des arilles de la grenade séchés aux différentes températures (55, 65, 75°C); avait considérablement augmenté avec l'augmentation de la température.

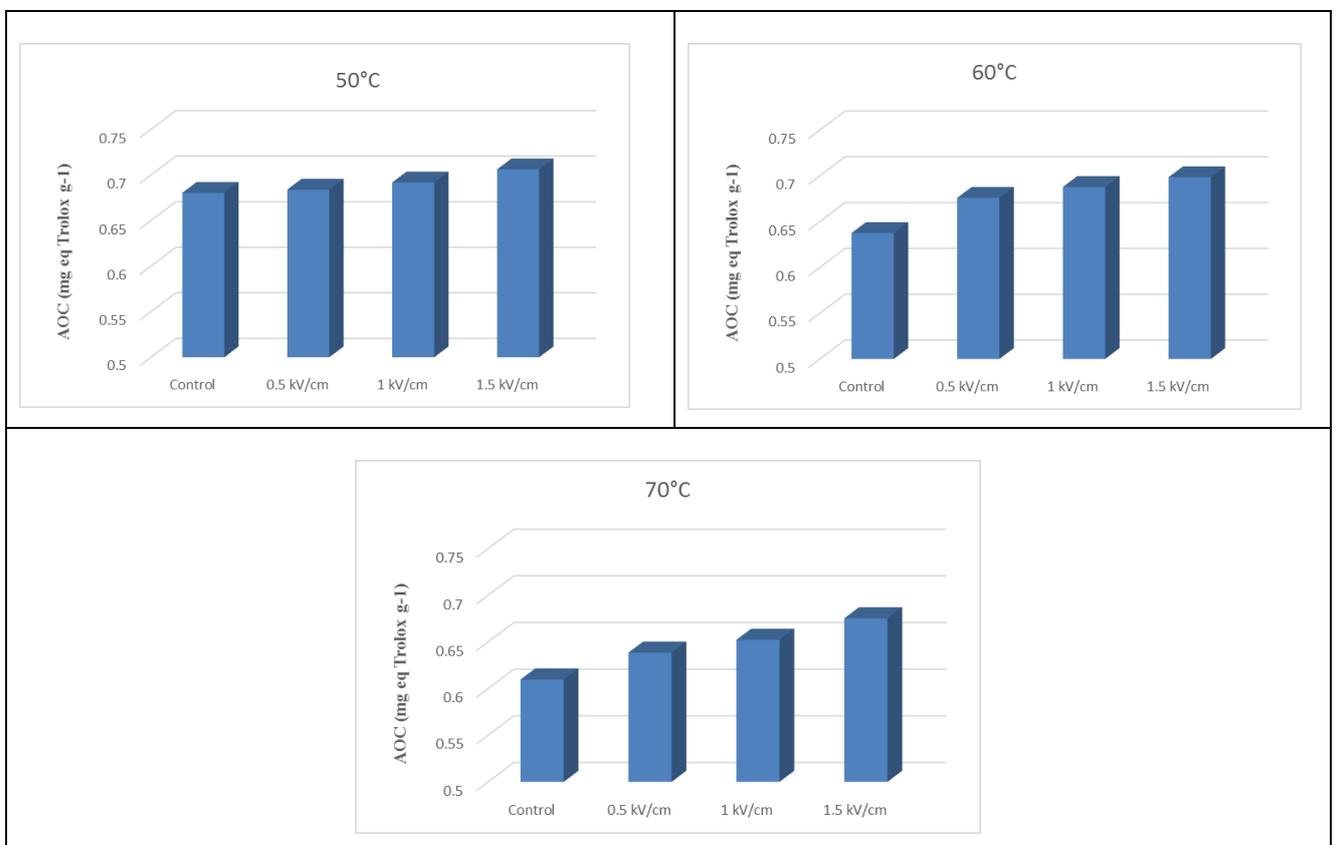


Figure 47: Capacité antioxydante des arilles séchés par micro-onde aux différentes températures et prétraités avec différentes intensités du CEP.

4. Conclusions

L'utilisation de la technologie CEP peut être appliquée pour améliorer le processus de séchage des matériaux dérivés des plantes, comme les arilles de la grenade. Il a été démontré dans cette étude que l'application du CEP sur les arilles de la grenade par une série d'impulsions très courtes caractérisées par une intensité du champ électrique élevée provoque l'électroporation.

L'application du prétraitement CEP réduit non seulement le temps de séchage, mais contribue également à maintenir la qualité des arilles. La désintégration cellulaire facilite la libération de l'humidité du produit, ce qui réduit le temps de séchage. De plus, la diffusion de l'humidité augmentait de $5,44 \times 10^{-9}$ à $8,25 \times 10^{-8}$ m²/s dans le tissu prétraité au CEP. Une diffusion plus élevée a entraîné une réduction de 27,78% du temps de séchage pour les échantillons prétraités au CEP en utilisant une intensité du champ de 1,5 kV/cm. Cela a également donné des arilles séchés d'une meilleure couleur qui avaient la dureté la plus faible, une teneur élevée en polyphénols totaux et une capacité antioxydante élevée.

Enfin, les modèles appropriés qui correspondent le mieux aux données de séchage étaient Midilli et *al.*, et le modèle logistique modifié.

Chapitre 6:
**Effets d'un prétraitement par
ultrasons sur le séchage des arilles**

Impact du prétraitement aux ultrasons sur la cinétique et la qualité des arilles de la grenade pendant le séchage convectif et par microonde assisté à l'air chaud

Résumé

L'objectif de cette étude était d'évaluer l'influence du prétraitement ultrasonique combiné au séchage convectif et par microondes assisté à l'air chaud, sur le temps du séchage et la qualité physico-chimique et l'activité biologique (activité antioxydante, teneur en polyphénols) des arilles de la grenade. Les arilles ont été soumises à un prétraitement par ultrasons de 0, 10, 20 et 30 min à 40 kHz et séchées à 50, 60 et 70°C.

Les résultats ont montré que la vitesse du séchage après le prétraitement était significativement plus élevée que celle des arilles non prétraités. Par conséquent, le prétraitement par ultrasons a réduit le temps du séchage sans entraîner une altération qualitative dans les arilles.

Les résultats ont montré que la diminution du temps de séchage augmente avec l'augmentation du temps de traitement par ultrasons de 0 à 30min. La plus grande réduction du temps de séchage était à 30 min.

En ce qui concerne les images de microscopie électronique à balayage (MEB), il a été constaté que le prétraitement, en particulier avec un temps de 30min, amélioré la porosité des arilles.

Ces arilles séchées traitées sont caractérisées par une teneur élevée en polyphénols totaux et une capacité antioxydante élevée. La cinétique du séchage a été modélisée par différents modèles. Les modèles qui correspondent le mieux aux données du séchage étaient Midilli et al., suivi d'un modèle logistique logarithmique et modifié.

Mots clés : Grenade, Ultrasons, Séchage par micro-ondes assisté à l'air chaud, Séchage convectif.

1. Introduction

La consommation des fruits de la grenade a continué de recevoir un intérêt mondial parmi les consommateurs en raison de leur richesse en propriétés nutritionnelles et de leur teneur élevée en polyphénols (**Mphahlele et al., 2019**).

Le point négatif à propos de la grenade est qu'elle se dégrade sévèrement après la récolte, ce qui entraîne de grands déchets agricoles. Pour surmonter le taux de décomposition élevé de ce produit et réduire ses déchets, il peut être séché après la récolte. Le processus de séchage réduit l'activité de l'eau de l'échantillon pour augmenter sa durée de conservation et diminue son volume pour diminuer les coûts d'emballage, de stockage et de transport (**Dehsheikh et Dinani, 2019**). Il existe des nombreuses méthodes de séchage des aliments, chacune ayant ses propres avantages et inconvénients.

La plupart des techniques de séchage conventionnelles, y compris le séchage à l'air chaud, nécessitent un long temps de séchage, même à des températures élevées, ce qui diminue la qualité des produits séchés. Ces dernières années, certaines nouvelles technologies de séchage, telles que la lyophilisation et le séchage à la micro-onde, ont été appliquées (**Xu et al., 2020**).

Le séchage par micro-ondes peut être considéré comme un processus de déshydratation rapide pour améliorer la qualité des produits secs, parce qu'il réduit le temps de séchage.

Le non uniformité du champ électromagnétique pourrait créer des points chauds (d'entraîner des brûlures locales) et endommager la texture en raison d'un transfert de masse rapide pendant le séchage. Par conséquent, la combinaison des systèmes de séchage par micro-ondes avec convection et avec le sous vide sont les techniques les plus utilisées pour éviter la surchauffe et pour améliorer la qualité du produit.

Dans les systèmes de séchage aux micro-ondes combinés par convection, l'énergie des micro-ondes élimine l'eau du produit à l'état libre et l'air convectif aide à éliminer l'humidité de la chambre du séchage. Ainsi, les systèmes combinés augmentent non seulement la vitesse du séchage, mais augmentent également la qualité du produit sec obtenu.

Des nombreuses études ont été réalisées avec des techniques de séchage par micro-ondes et par convection pour un certain nombre des produits agricoles (**Esturk, 2012**). Toutefois, il existe peu d'informations disponibles sur le séchage des produits agricoles utilisant la technique du séchage par micro-ondes combiné à l'air chaud.

La méthode industrielle la plus utilisée dans le séchage des aliments est le processus convectif. Cette approche n'est pas souhaitable car elle gaspille beaucoup d'énergie, demande beaucoup du temps, modifie la couleur du produit et en général donne un produit qui n'est pas acceptable pour le consommateur (**Dehsheikh et Dinani, 2019**).

Pour surmonter les inconvénients mentionnés du séchage, il peut être combiné avec des technologies modernes comme les ultrasons (**Ni et al., 2020**).

Les ondes ultrasonores se répartissent dans les milieux aqueux et produisent un phénomène de cavitation (génération, croissance et effondrement des bulles). L'effondrement rapide et asymétrique des bulles générées à la surface de l'échantillon entraîne des contractions et des expansions ultérieures, ce que l'on appelle l'effet éponge et crée des canaux microscopiques dans l'échantillon (**Cao et al., 2018**).

Les objectifs du présent travail sont d'étudier les effets du prétraitement par ultrasons sur le séchage des arilles de la grenade par deux méthodes (par convection et par micro-ondes assisté à l'air chaud) en ce qui concerne la cinétique du séchage, la qualité physico-chimique et nutritionnelle des arilles séchés et le meilleur modèle mathématique pour prédire la cinétique de séchage.

2. Matériels et méthodes

2.1. Produit

Des fruits frais de la grenade (*P. granatum* L. doux-acide) ont été obtenus en automne dans la ville d'Ain Touta (Batna, Algérie). Les fruits ont été récoltés à pleine maturité avec les caractéristiques suivantes: pH $3,56 \pm 0,06$ et $15 \pm 0,09^\circ$ Brix. Ils ont été conservés au

réfrigérateur à $4\pm 1^\circ\text{C}$ jusqu'à leur utilisation. Avant les processus de séchage, la grenade a été lavée et coupée et les arilles ont été séparés manuellement. Les arilles blessés ont été retirés et jetés.

2.2. Prétraitement par ultrasons

Le traitement a été effectué à l'aide d'un bain à ultrasons (Q13/25, Ultronique Brésil; fréquence de 40kHz) contenant d'eau. Des échantillons de 30g des arilles de la grenade ont été immergés dans un bécher en verre contenant d'eau distillée ensuite placé directement dans le bain à ultrasons. Le prétraitement a été effectué pendant 10, 20 et 30 min. La température a été maintenue à $25\text{-}30^\circ\text{C}$ par immersion d'eau glacée dans le bain. Les arilles ont été retirés du bécher à la fin de la durée du traitement et leur humidité de surface a été doucement essuyée.

2.3. Méthodes de séchage

La teneur en humidité initiale (M_0) des arilles était de $80 \pm 0,8\%$ (wb). Elle a été déterminée par séchage dans une étuve à vide à 70°C pendant 24 heures selon la méthode de l'Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 1990).

Des échantillons des arilles prétraités d'environ 30 g ont été soumis à deux protocoles de séchage différents.

2.3.1. Séchage micro-ondes assisté à l'air chaud

Le séchage des arilles de la grenade (environ 30 g) a été effectué au Laboratoire de génie post-récolte, Département de génie des bioressources, Université McGill, Canada. Le séchage a été effectué dans un système de micro-ondes assisté par convection (figure 48). Le générateur de micro-ondes fonctionnait à 2,45 GHz avec une puissance allant de 0 à 100 W. Deux détecteurs à cristaux (Hewlett Packard Model 420A Detectors, Californie, États-Unis), surveillaient l'incident et la puissance réfléchi. La température des arilles a été mesurée à l'aide d'une sonde à fibre optique (série Nortech EMI-TS, Québec, Canada). Les températures de l'air d'entrée et de sortie ont été mesurées à l'extérieur de la cavité à l'aide d'un thermocouple de type T. La masse de l'échantillon pendant son séchage a été mesurée en utilisant une cellule de charge (signal de conditionneur Imperial Instruments TM-2, IL, USA). Tous les capteurs étaient connectés à une unité d'acquisition/commutation de données (Agilent 34970A, CA, USA) et étaient surveillés par un ordinateur. Les programmes d'acquisition et de contrôle ont été écrits à l'aide d'Agilent VEE Pro Ver 8.0 (CA, USA). L'air chaud contrôlé par PID fournit de l'air chaud à la cavité micro-ondes. Le séchage a été réalisé aux trois températures différentes (50 , 60 et 70°C), avec une puissance de 100 W et avec trois répétitions.

Les arilles de la grenade ont été placés dans un récipient cylindrique en plastique de 30 cm³. Pour éviter une surchauffe localisée dans les arilles, le récipient a été tourné et un ventilateur électrique a été installé au bas du séchoir pour produire un courant d'air. Le processus du séchage a été arrêté lorsque la teneur en humidité de l'échantillon était stable.

Après refroidissement, les arilles de la grenade séchés ont été emballés sous vide dans un sac en polyéthylène.

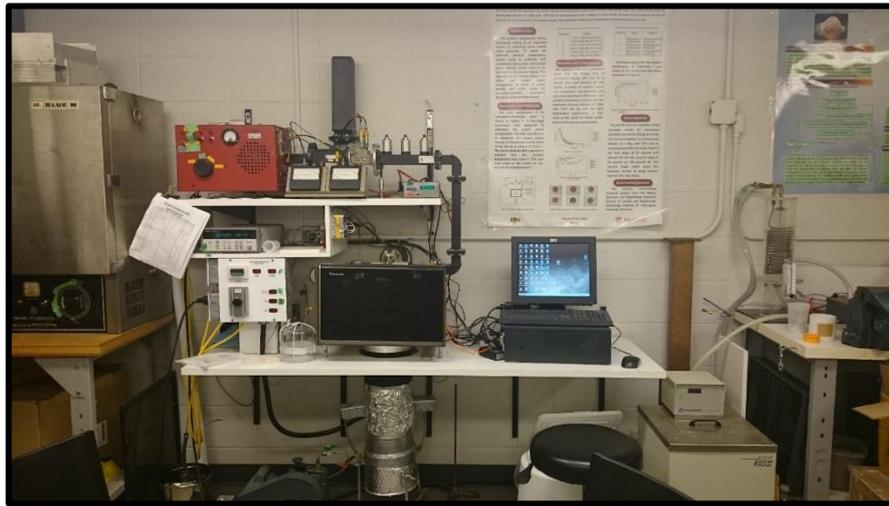


Figure 48: Installation du séchage par micro-ondes assisté à air chaud.

2.3.2. Séchage convectif

Le séchage convectif a été réalisé dans un four ventilé MEMMERT (UF750, Allemagne). Le séchoir d'armoire se compose essentiellement d'un ventilateur centrifuge pour alimenter le flux d'air, un élément chauffant électrique, un filtre à air et un panneau de commande. La température de l'air est contrôlée au moyen d'un régulateur proportionnel et la vitesse de l'air est régulée par le contrôle de l'unité de la vitesse du ventilateur.

Le processus de séchage a été effectué à trois températures différentes 50, 60 et 70°C avec trois répétitions. La vitesse de l'air a été maintenue constante ($2,0 \pm 0,1$ m/s) et la perte du poids de l'échantillon pendant le séchage a été mesurée à des intervalles de 10 min. Le processus de séchage a été arrêté lorsque la teneur en humidité des échantillons est devenue constante. Les arilles de la grenade séchés sont emballés dans des sacs en polyéthylène sous vide après refroidissement.

2.4. Modélisation mathématique du processus de séchage

2.4.1. Cinétique de séchage

Le taux d'humidité (MR) des arilles de la grenade a été calculé à l'aide de l'Eq. (41):

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (41)$$

Où: M_t et M_0 sont les teneurs en humidité (kg d'eau/kg dm) au temps "t" et au temps "0", respectivement, M_e est l'humidité à l'équilibre (kg d'eau/kg dm).

Différents modèles de cinétique de séchage ont été utilisés pour décrire le séchage de la grenade (tableau 22). L'analyse de régression non linéaire a été réalisée à l'aide du logiciel Sigma Plot\SPW11 (version 11, 2008, USA) pour ajuster les données expérimentales des modèles d'équation sélectionnés. Une analyse statistique a été utilisée pour évaluer l'ajustement des données expérimentales aux différents modèles, R^2 (coefficient de détermination), réduction du chi carré (χ^2) et de l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Ces paramètres ont été calculés à l'aide des équations ci-dessous:

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{ei} - MR_{pi})^2}{N - Z} \quad (42)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{ei} - MR_{pi})^2} \quad (43)$$

Où: M_{Rei} est le taux d'humidité expérimental, M_{Rpi} est le taux d'humidité prévu, N est le nombre d'observations et Z est le nombre des constantes dans un modèle.

Tableau 22: Modèles mathématiques utilisés pour décrire le taux d'humidité de la courbe de séchage en couche mince.

No.	Nom du modèle	Equation	Reference
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$	Bruce, (1985)
2	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Hashim et al., (2014)
3	Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Midilli et al., (2002)
4	Two-term	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(k_1t)$	Sacilik, (2007)
5	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	Togrul et Pehlivan, (2002)
6	Modified Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	Zenoozian et al., (2008)
7	Wang and Singh	$MR = 1 + a + bt^2$	Wang et Singh, (1978)

2.4.2. Détermination de la diffusion efficace de l'humidité (Deff)

La diffusivité effective a été calculée sur la base de la deuxième loi de Fick de l'équation de diffusion (Eq. 44):

$$\frac{\delta M}{\delta t} = D_{eff} \nabla^2 M \quad (44)$$

La solution analytique de l'Eq. (44) pour la migration d'humidité par diffusion dans un objet sphérique à la température constante pendant le processus du séchage est donnée par:

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{L^2} t\right) \quad (45)$$

Où: D_{eff} est la diffusivité effective de l'humidité (m^2/s), t est le temps de traitement (s), L est la demi-épaisseur de l'échantillon (m).

Pour des périodes de séchage plus longues, l'Eq.(46) a été utilisé:

$$\ln MR = \ln \frac{6}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff}}{L^2} t \quad (46)$$

La diffusivité effective a été obtenue en traçant les données expérimentales de séchage exprimées en termes de $\ln(MR)$ en fonction du temps, où la pente de la courbe "K" est calculée par l'Eq.(47):

$$K = \frac{\pi^2 D_{eff}}{R^2} \quad (47)$$

2.4.3. Calcul de l'énergie d'activation

La dépendance à la diffusivité de l'humidité effective et de la température est décrite par l'équation d'Arrhenius (Eq. 48):

$$D_{eff} = D_0 e^{\frac{E_a}{R(T+273,15)}} \quad (48)$$

Où: D_0 est le facteur pré-exponentiel d'Arrhenius (m^2/s), E_a (kJ/mol) est l'énergie d'activation, R est la constante de gaz universelle 8,31 (kJ/mol.K) et T ($^{\circ}C$) est la température.

2.5. Propriétés physique et chimique des arilles séchés

2.5.1. Analyse de la couleur

La couleur des échantillons séchés a été mesurée en utilisant un chromomètre (Minolta, CR-300X, Japon). La couleur est déterminée comme L^* , a^* et b^* des paramètres CIE.

L^* , a^* et b^* indiquent respectivement la légèreté, la rougeur-verdure et le jaunissement-bleuissement.

2.5.4. Microscope électronique à balayage

La morphologie de la surface et les microstructures des arilles traités avec des ultrasons ont été visualisées à l'aide d'un microscope électronique à balayage (Hitachi TM-3000, Tokyo, Japon) pour une analyse microstructurale comparative.

2.5.5. Analyse de la texture

La dureté des arilles a été déterminée en utilisant un analyseur de texture (Instron 4502, USA) avec une sonde à plaque de compression de 100 mm. L'analyseur de texture était relié à un ordinateur qui enregistrait et analysait les données via un logiciel. Les conditions de fonctionnement de l'instrument étaient les suivantes: vitesse de pré-test de 1,5 mm/s, vitesse de test de 0,5 mm/s, vitesse de post-test de 10,0 mm/s, force de déclenchement était de 0,10 N. La dureté a été mesurée pendant cinq différents échantillons.

2.5.6. Phénoliques totaux

La procédure d'extraction modifiée de **Süfer et Palazoğlu, (2019)** a été utilisée dans cette étude. Un gramme d'échantillon d'arilles séchés broyés a été mélangé avec 10 ml de méthanol à 80%. Le mélange a ensuite été vortexé pendant 15s et traité aux ultrasons pendant 20 min à 25°C (Fisher Scientific FS30, Mexique) et après centrifugé pendant 15 min (Sigma 4-5L, Allemagne). Les surnageants ont été filtrés et stockés à 4°C jusqu'à l'analyse spectrophotométrique. Une solution de méthanol (80%) a été utilisée comme blanc dans toutes les analyses chimiques, et chaque essai a été effectué en triple.

La méthode Folin-Ciocalteu mentionnée par **Süfer et Palazoğlu, (2019)** a été utilisée pour déterminer la teneur totale en phénol. La procédure a consisté à mélanger 0,5 ml d'extrait avec 0,5 ml de réactif Folin-Ciocalteu; auquel 3 ml de Na_2CO_3 à 10% ont été ajoutés. Le mélange a ensuite été placé dans l'obscurité pendant 30 minutes. L'absorbance a été mesurée à une longueur d'onde de 760 nm en utilisant un spectrophotomètre (Shimadzu, UV 1800, Japon). Les résultats ont été exprimés en mg GAE (équivalent d'acide gallique)/kg de matière sèche.

2.5.7. Capacité antioxydante

Les activités d'élimination des radicaux libres ont été évaluées en utilisant la méthode des radicaux 2,2 diphényl-1-picrylhydrazyle (DPPH) décrite par **Calín-Sánchez et al., (2012)**. Pour chaque échantillon, 2 g des arilles séchés ont été homogénéisés dans 5 ml de MeOH/eau (80:20 v/v) puis centrifugés à 15 000 tr/min pendant 20 min. Dix μl du surnageant ont été mélangés avec 40 μl de MeOH et ajoutés à 950 μl d'une solution de DPPH 0,094 mM. Après incubation pendant 50 min dans un endroit sombre, les absorbances ont été mesurées à une longueur d'onde de 515 nm à l'aide d'un spectrophotomètre (Shimadzu, UV 1800, Japon). Les résultats ont été exprimés en mg d'équivalent Trolox /g de Ms.

2.6. Analyses statistiques

L'analyse de variance (ANOVA) a été réalisée en utilisant les procédures General Linear Models (GLM) du logiciel SigmaPlot\SPW11 (version 11, 2008, USA). Les expériences ont été effectuées en triple et les moyennes des trois ensembles de données ont été utilisées. Les moyennes ont été séparées par la différence la moins significative selon le test à plages multiples de Duncan.

3. Résultats et discussion

3.1. Comportement au séchage des arilles de grenade

3.1.1. Taux d'humidité et le taux de séchage

Le séchage est un processus important dans le traitement des matières agricoles. Il s'agit également d'une méthode classique de conservation des aliments, qui offre une durée de conservation plus longue (**Demiray et al., 2017**)

La cinétique du séchage par micro-ondes assisté à l'air chaud et par séchage convectif des arilles de la grenade prétraités et non traités par ultrasons est illustrée aux figures 49 et 50 en fonction du temps de prétraitement et de la température.

La teneur en humidité des arilles de la grenade était inversement proportionnelle à la température du séchage et au temps de traitement par ultrasons et a diminué de façon exponentielle au fil du temps. Il est évident que la température de l'air de séchage a un effet important sur le séchage des arilles. Comme prévu, le taux du séchage augmentait avec l'augmentation de la température et par conséquent diminuait le temps du séchage requis.

L'expérience confirme que les traitements par ultrasons ont affecté le temps du séchage. Il a été observé une variation du temps de séchage de 300 à 1000 min pour le séchage convectif et de 50 à 200 min pour le séchage par microonde. Des différences significatives dans le temps

de séchage ont été trouvées entre les traitements de séchage par convection et les traitements de séchage par micro-ondes assisté à l'air (figures 49 et 50).

Le temps du séchage le plus long (1000 ± 5 min) a été obtenu pour les arilles non traités séchés par convection à 50°C . Cela était cinq fois plus lent que celui requis pour les arilles séchés par microondes assisté (200 ± 5 min). Tandis que le temps le plus court (50 ± 5 min) a été observé pour les arilles prétraités avec 30min et séchés par micro-ondes assisté à 70°C .

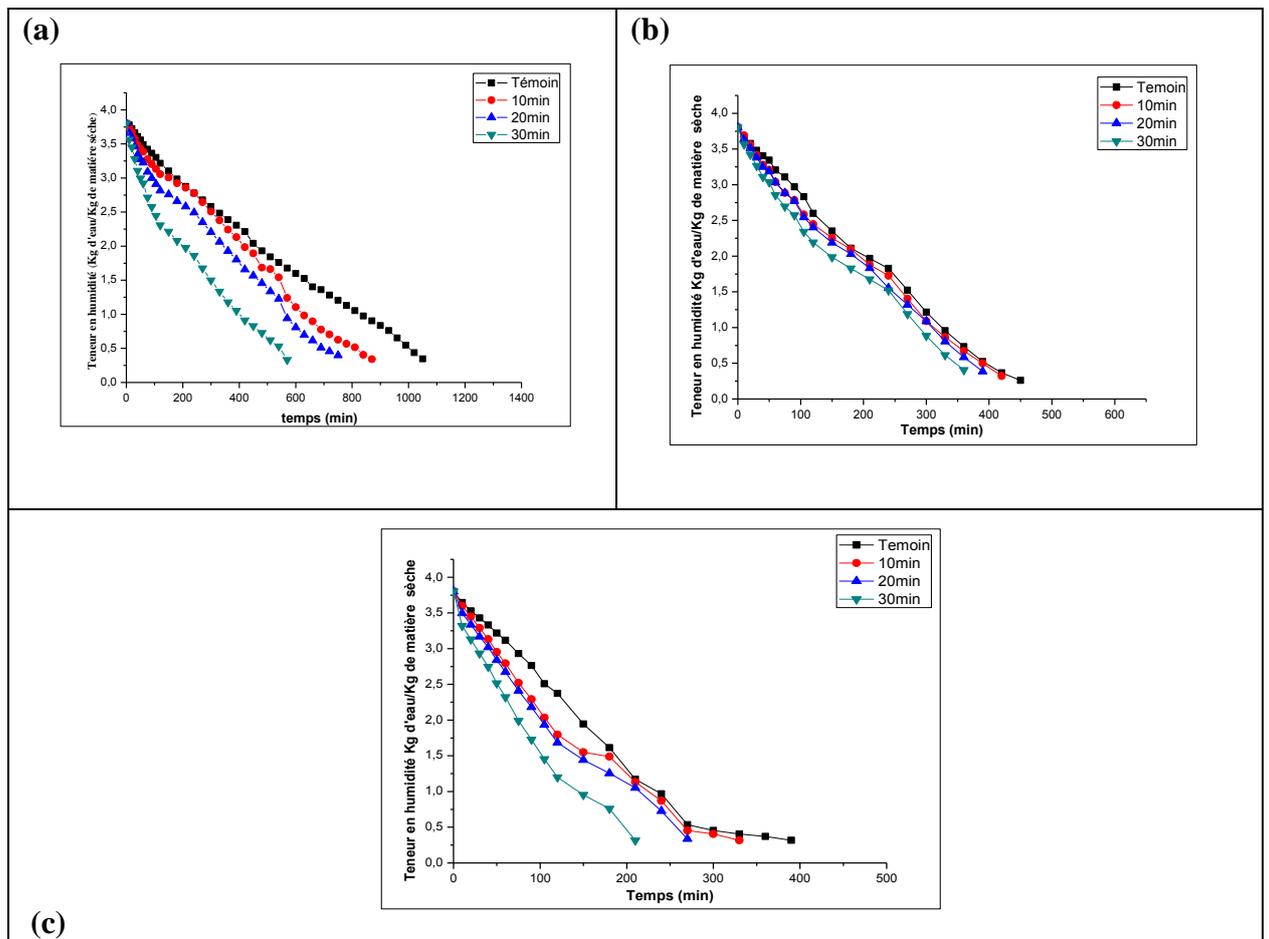


Figure 49: Influence de l'ultrason et de la température sur la teneur en humidité des arilles lors du séchage à l'air chaud: a) à 50°C , b) à 60°C et c) à 70°C .

Tous les prétraitements par ultrasons appliqués ont favorisé une réduction significative du temps de séchage. La réduction la plus élevée était d'environ 67% dans le séchage par micro-ondes combiné à l'air chaud à 50°C et prétraités à 30 min.

Lorsque les ondes ultrasonores se propagent dans un milieu liquide, le phénomène de cavitation se produit (formation, croissance et effondrement d'une bulle) et l'effet d'éponge (alternance de compression et d'expansion des tissus végétaux). Ces effets entraînent des modifications de la structure des tissus des plantes (formation des canaux microscopiques). Ces modifications structurelles sont responsables de la réduction du temps de séchage, car elles diminuent la résistance au transfert de masse, facilitant l'évaporation de l'eau pendant le séchage (Zotti-

Sperotto et al., 2020). L'optimisation du transfert de masse a déjà été signalée dans plusieurs produits, comme la pomme (**Fernandes et al., 2015**). Les canaux microscopiques se sont formés autour de 20 et 30 min d'application par ultrasons, comme cela s'est produit avec la plupart des fruits qui ont été précédemment étudiés (**Fernandes et al., 2019**).

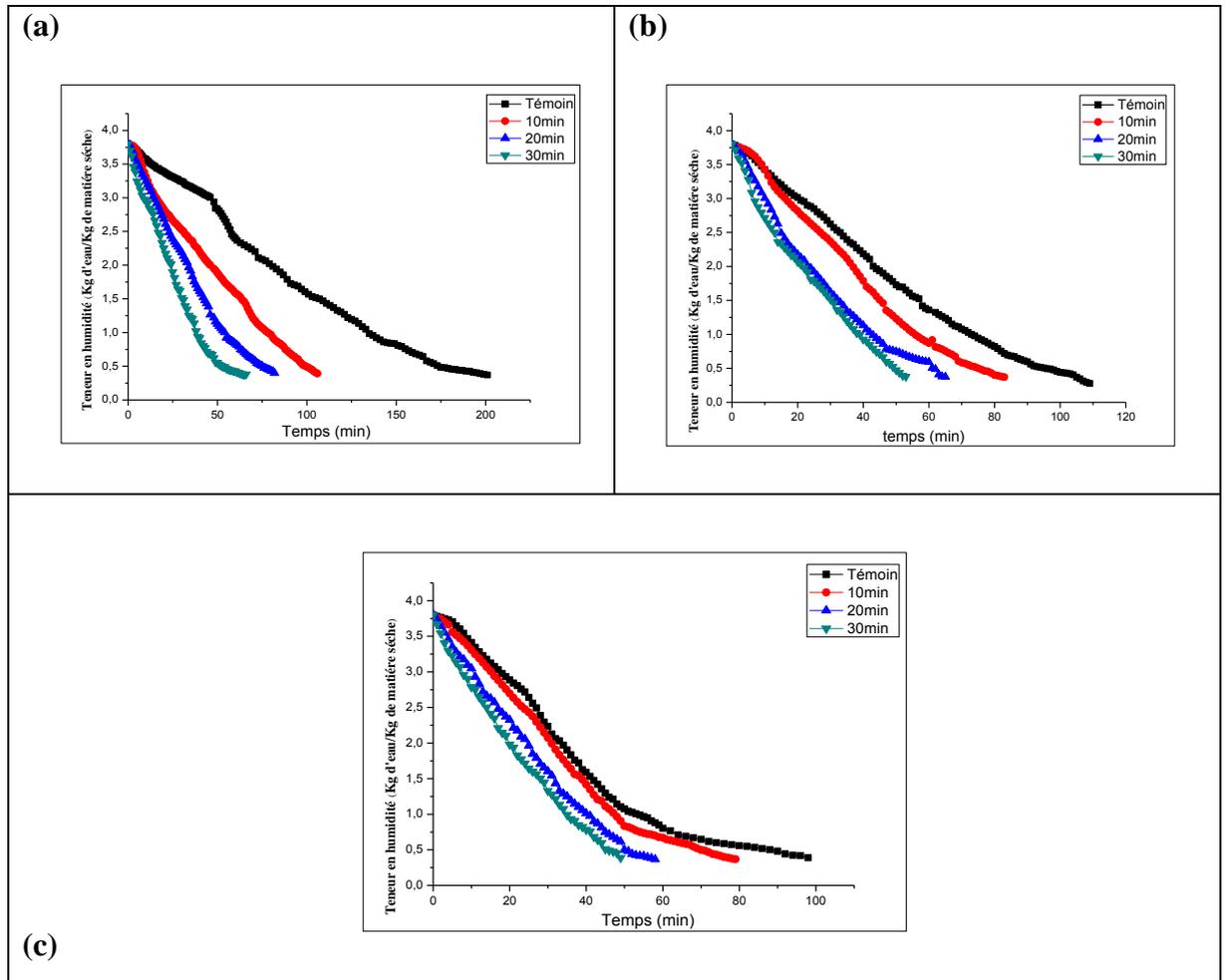


Figure 50: Influence des ultrasons et de la température sur la teneur en humidité des arilles lors du séchage par micro-ondes assisté à l'air chaud: a) à 50, b) à 60 et c) à 70°C.

Le temps du séchage des autres aliments a montré un comportement similaire après le prétraitement aux ultrasons: ananas (**Rani et Tripathy, 2019**), kiwi (**Liu et al., 2020**), banane (**La Fuente et Tadini, 2018**) et la mangue (**Fernandes et al., 2019**).

3.1.2 Évaluation des modèles du séchage

Ces modèles ont été évalués à l'aide des outils statistiques: le coefficient de détermination (R^2), le chi carré (χ^2) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE).

Les taux d'humidité (MR) aux différentes conditions du séchage ont été ajustés aux sept modèles.

Les résultats des sept modèles pour les deux méthodes du séchage (convectif et par micro-onde), aux différentes températures et aux différents temps de prétraitement par ultrasons sont répertoriés dans les tableaux 23 et 24.

Tableau 23: Qualité d'adaptation des modèles pour le séchage à l'air chaud prétraité par ultrason aux différentes températures.

N° Modèle 50°C	Coefficients	Témoin	10min	20min	30min
1	R ²	0,9912	0,9866	0,9916	0,9957
	χ^2	0,001446219	0,002357463	0,00141258	0,000343754
	RMSE	0,033031379	0,047874608	0,037010461	0,018180559
2	R ²	0,9925	0,9884	0,9916	0,9959
	χ^2	0,001290289	0,002111689	0,001462222	0,000337981
	RMSE	0,035054914	0,044658403	0,037062142	0,017663034
3	R ²	0,9995	0,9987	0,9984	0,9988
	χ^2	0,000571056	0,000586873	0,000335192	0,000276002
	RMSE	0,023027512	0,023194124	0,01745624	0,015625472
4	R ²	0,9925	0,9884	0,9916	0,9959
	χ^2	0,001358199	0,00224367	0,001563065	0,000368707
	RMSE	0,035054914	0,044658403	0,037062142	0,017663034
5	R ²	0,9993	0,9987	0,9983	0,9997
	X ²	5,96258E-05	0,000624736	0,001619373	8,15223E-05
	RMSE	0,007247587	0,023194124	0,037067691	0,008114489
6	R ²	0,9925	0,9884	0,9916	0,9959
	χ^2	0,001433655	0,002393248	0,00167935	0,000405578
	RMSE	0,035054914	0,044658403	0,037067691	0,017663034
7	R ²	0,9994	0,9988	0,9982	0,9968
	X ²	0,000111365	0,000413846	0,000414794	0,000957699
	RMSE	0,010169073	0,01947714	0,019418698	0,029106624
N° Modèle 60°C	Coefficients	Témoin	10min	20min	30min
1	R ²	0,9831	0,9804	0,9795	0,9854
	χ^2	0,003098371	0,003222383	0,003575278	0,002386789
	RMSE	0,05432154	0,055397979	0,058352608	0,047617747
2	R ²	0,9878	0,9845	0,9835	0,9868
	χ^2	0,002362929	0,002697116	0,003048894	0,002289212
	RMSE	0,046237305	0,049398866	0,052521643	0,045390421
3	R ²	0,9994	0,9995	0,9992	0,9992
	χ^2	0,000118723	0,000353042	0,000163103	0,000238525
	RMSE	0,010087763	0,017395614	0,01182381	0,014238896
4	R ²	0,9878	0,9845	0,9835	0,9868
	χ^2	0,002640921	0,003014424	0,003407587	0,002575363
	RMSE	0,046237305	0,049398866	0,052521643	0,045390421
5	R ²	0,9994	0,9991	0,9992	0,9992
	X ²	0,000133564	9,80293E-05	0,000183491	0,000270328
	RMSE	0,010087763	0,008642278	0,01182381	0,014238896
6	R ²	0,9878	0,9845	0,9835	0,9868
	χ^2	0,002993044	0,003416092	0,003861932	0,062504935
	RMSE	0,046237305	0,049397022	0,052521643	0,209173265
7	R ²	0,9995	0,9995	0,9992	0,9992
	X ²	0,000113769	0,008346381	0,000234213	0,000164941

Chapitre 6:		Effets d'un prétraitement par ultrasons sur le séchage			
	RMSE	0,009875031	0,084581561	0,014168765	0,01184059
N° Modèle 70°C	Coefficients	Témoin	10min	20min	30min
1	R ²	0,9632	0,9786	0,9829	0,9891
	χ ²	0,006994569	0,016288921	0,002892351	0,001438171
	RMSE	0,081136453	0,123817404	0,052174831	0,036637314
2	R ²	0,9718	0,9836	0,9853	0,9899
	χ ²	0,005740462	0,019700168	0,002663255	0,001478059
	RMSE	0,071169613	0,131842715	0,048476084	0,035790844
3	R ²	0,9981	0,9993	0,9993	0,9985
	χ ²	0,000249495	0,01605998	0,000156576	0,000286738
	RMSE	0,014334113	0,115003765	0,01135538	0,015145644
4	R ²	0,9718	0,9836	0,9853	0,9899
	χ ²	0,00662361	0,022730963	0,003072986	0,001746797
	RMSE	0,071169613	0,131842715	0,048476084	0,035790844
5	R ²	0,9974	0,9987	0,999	0,9985
	X ²	0,000323436	0,01877553	0,000147938	0,000344086
	RMSE	0,015109858	0,115123045	0,010218959	0,015145644
6	R ²	0,9718	0,9836	0,9853	0,9899
	χ ²	0,007827903	0,026855431	0,003631711	0,001746797
	RMSE	0,071169613	0,131822015	0,048476084	0,033619644
7	R ²	0,9991	0,9993	0,9993	0,999
	X ²	0,00019526	0,015985668	0,000132116	0,000206171
	RMSE	0,012680788	0,114737387	0,010430774	0,013030253

Les résultats statistiques des modèles y compris les critères de comparaison utilisés pour évaluer la qualité de l'ajustement à savoir le R², χ² et le RMSE. Dans tous les cas, les valeurs R² pour les modèles étaient supérieures à la valeur acceptable de 0,9, indiquant un bon ajustement. Comme le montre les tableaux 25 et 26, la valeur la plus élevée de R² et les valeurs les plus faibles de χ² et RMSE ont été obtenus à partir du modèle logarithmique et modifié de Midilli et *al.*, (2002). En conséquence, ces modèles ont été sélectionnés comme modèle approprié pour représenter le comportement de séchage en couche mince des arilles de la grenade. De plus, ces modèles ont donné des résultats similaires avec d'autres cultures et sous-produits agricoles (Alara et *al.*, 2019; Kaveh et *al.*, 2018).

Tableau 24: Qualité d'adaptation des modèles pour séchage par micro-ondes assisté à l'air chaud prétraité par ultrason aux différentes températures.

N° Modèle 50°C					
	Coefficients	Témoin	10min	20min	30min
1	R ²	0,9912	0,9862	0,9839	0,9834
	χ^2	0,001446219	0,009575984	0,004133862	0,002648625
	RMSE	0,033031379	0,097398606	0,063911258	0,051073425
2	R ²	0,9925	0,9901	0,9906	0,9872
	χ^2	0,001290289	0,009349057	0,001498732	0,002077798
	RMSE	0,035054914	0,09578261	0,038249814	0,044886908
3	R ²	0,9995	0,9988	0,9976	0,9950
	χ^2	0,000571056	0,000175788	0,000383308	0,000826115
	RMSE	0,023027512	0,013071311	0,019225454	0,028081381
4	R ²	0,9925	0,9901	0,9906	0,9872
	χ^2	0,001358199	0,001430556	0,001536201	0,002144824
	RMSE	0,035054914	0,037108991	0,038249814	0,044886908
5	R ²	0,9993	0,9982	0,9976	0,9950
	X ²	5,96258E-05	0,000131404	0,000393012	0,0008532
	RMSE	0,007247587	0,011192108	0,019225454	0,028081381
6	R ²	0,9925	1	0,9906	0,9872
	χ^2	0,001433655	0,001456247	0,00157557	0,002216318
	RMSE	0,035054914	0,037075441	0,038249567	0,044886908
7	R ²	0,9994	0,9987	0,9985	0,9965
	X ²	0,000111365	0,000196315	0,000247196	0,009360142
	RMSE	0,010169073	0,013813421	0,015439165	0,094523444
N° Modèle 60°C					
	Coefficients	Témoin	10min	20min	30min
1	R ²	0,9831	0,9730	0,9942	0,9924
	χ^2	0,003098371	0,004574556	0,000853027	0,000996136
	RMSE	0,05432154	0,06723167	0,028984514	0,031268025
2	R ²	0,9878	0,9858	0,9975	0,9931
	χ^2	0,002362929	0,002454037	0,000378828	0,00092832
	RMSE	0,046237305	0,048944942	0,019166336	0,029898793
3	R ²	0,9994	0,9971	0,9991	0,9982
	χ^2	0,000118723	0,000506552	0,000131587	0,000248854
	RMSE	0,010087763	0,022101146	0,011207386	0,015330646
4	R ²	0,9878	0,9858	0,9975	0,9931
	χ^2	0,002640921	0,002515388	0,000391048	0,000965453
	RMSE	0,046237305	0,048944942	0,019166336	0,029898793
5	R ²	0,9994	0,9971	0,9991	0,9994
	X ²	0,000133564	0,000519376	0,000135866	8,76844E-05
	RMSE	0,010087763	0,022101146	0,011205956	0,008919948
6	R ²	0,9878	0,9858	0,9975	0,9931
	χ^2	0,002993044	0,002579903	0,000404072	0,00100568
	RMSE	0,046237305	0,048945118	0,019166076	0,029898793
7	R ²	0,9995	0,9977	0,9992	0,9977
	X ²	0,000113769	0,000418009	0,003411634	0,003869283
	RMSE	0,009875031	0,020076855	0,057066278	0,060450996
N° Modèle 70°C					
	Coefficients	Témoin	10min	20min	30min
1	R ²	0,9632	0,9764	0,9830	0,9902
	χ^2	0,006994569	0,004086975	0,002661179	0,001367587
	RMSE	0,081136453	0,063533603	0,05114757	0,036609218

Chapitre 6:		Effets d'un prétraitement par ultrasons sur le séchage			
2	R ²	0,9718	0,9874	0,9884	0,9920
	χ^2	0,005740462	0,00221575	0,001851704	0,001137073
	RMSE	0,071169613	0,046486991	0,042295792	0,033039223
3	R ²	0,9981	0,9941	0,9989	0,9996
	χ^2	0,000249495	0,001058378	0,000175099	6,41029E-05
	RMSE	0,014334113	0,031924574	0,012891673	0,007762522
4	R ²	0,9718	0,9874	0,9884	0,9920
	χ^2	0,00662361	0,002273302	0,001919038	0,00118652
	RMSE	0,071169613	0,046486991	0,042295792	0,033039342
5	R ²	0,9974	0,9941	0,9989	0,9996
	X ²	0,000323436	0,001086183	0,000181584	6,69519E-05
	RMSE	0,015109858	0,031923888	0,012891673	0,007762522
6	R ²	0,9718	0,9874	0,9884	0,9920
	χ^2	0,007827903	0,002333924	0,001991418	0,001351013
	RMSE	0,071169613	0,046486991	0,042295404	0,034480301
7	R ²	0,9991	0,9960	0,9992	0,9996
	X ²	0,00019526	0,004003416	0,001733454	0,001744425
	RMSE	0,012680788	0,062089787	0,040562451	0,040493947

3.1.3 Diffusivité efficace de l'humidité (D_{eff})

La diffusivité effective de l'humidité a été calculée en utilisant la méthode des pentes. En utilisant les données expérimentales obtenues aux différentes conditions du séchage, le logarithme des valeurs du rapport d'humidité $\ln(MR)$ a été tracé en fonction du temps de séchage; où D_{eff} a été calculé en utilisant l'Eq. (47).

Les diffusivités d'humidité des arilles traités et non traités et séchés par les deux méthodes de séchage sont représentées sur les figures 51 et 52. Elles variaient de 1.72×10^{-8} à 9.77×10^{-8} m^2/s dans le séchage convectif et de 0.18×10^{-7} à 3.21×10^{-7} m^2/s dans le séchage par microonde assisté à l'air chaud. Les résultats ont montré que la méthode, la température et le prétraitement avaient un effet significatif ($p < 0,05$) sur la valeur de D_{eff} .

Le coefficient de diffusion minimum a été trouvé dans les arilles séchés par convection (1.72×10^{-8} m^2/s) et le maximum a été trouvé dans les arilles séchés par microonde (3.21×10^{-7} m^2/s). De même, la valeur de la diffusivité effective des arilles séchés prétraités aux ultrasons était supérieure à celle du groupe témoin (non traités).

Dans une recherche effectuée par (Bozkir *et al.*, 2019), il a été précisé que les micro-ondes étaient efficaces dans l'augmentation de D_{eff} et surtout lorsqu'elles sont combinés avec l'air chaud.

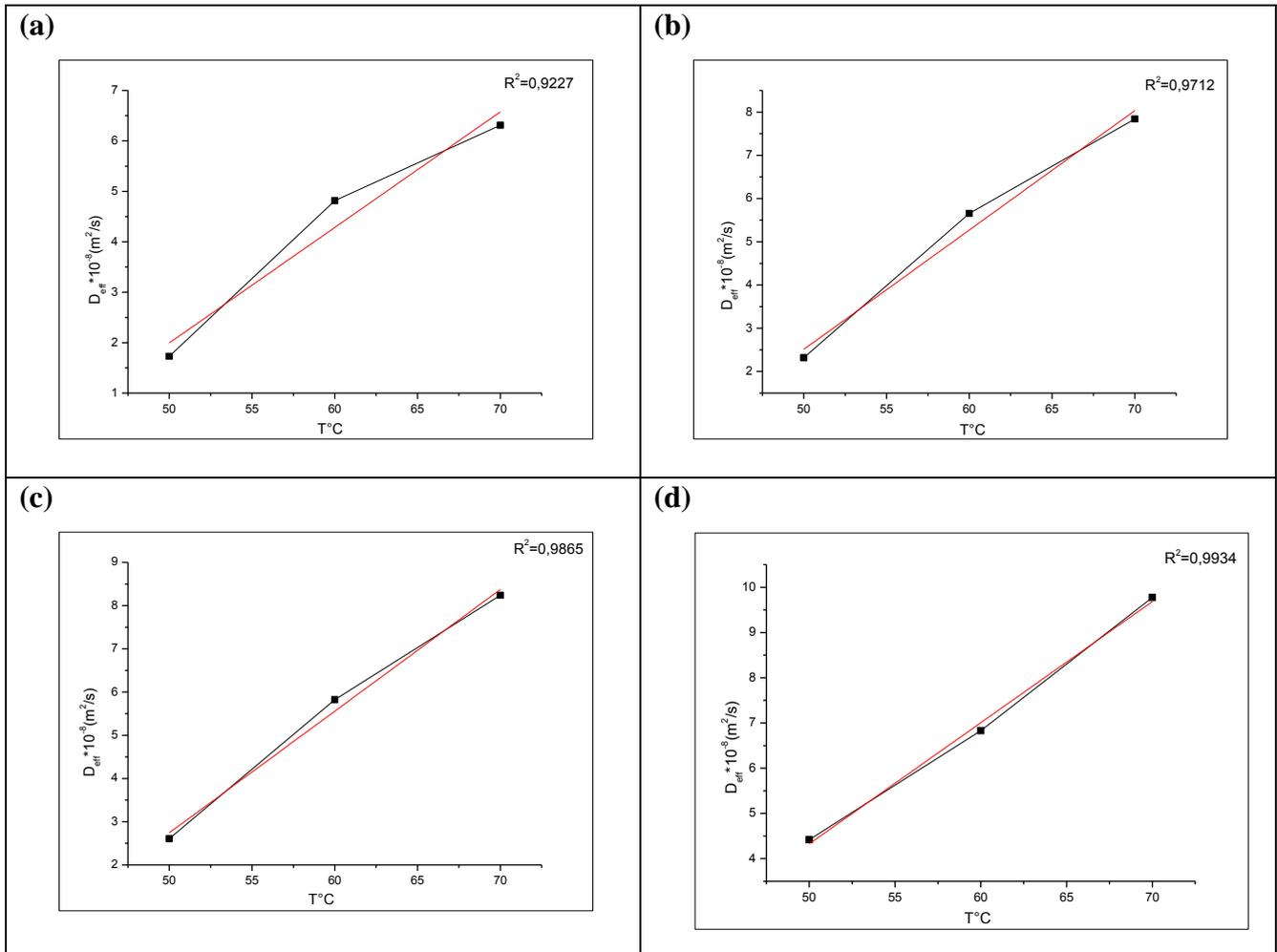


Figure 51: Diffusivité effective pendant le séchage convectif en fonction du temps de traitement : a) non traités, b) prétraités à 10min, c) à 20min et d) à 30min.

3.1.4. Détermination de l'énergie d'activation (E_a)

La consommation d'énergie se change selon la méthode appliquée, le prétraitement et la température du séchage.

L'énergie d'activation (E_a) a été déterminée en traçant (D_{eff}) en fonction de $1/T$. Ensuite; E_a été calculé en utilisant l'Eq. (48). Le minimum et le maximum de l' E_a pour les arilles de la grenade dans les différentes conditions était de 39 à 43.77 kJ/mol, dans le séchage convectif et 24.74 à 30.15 kJ/mol dans le séchage par micro-ondes assisté à l'air chaud.

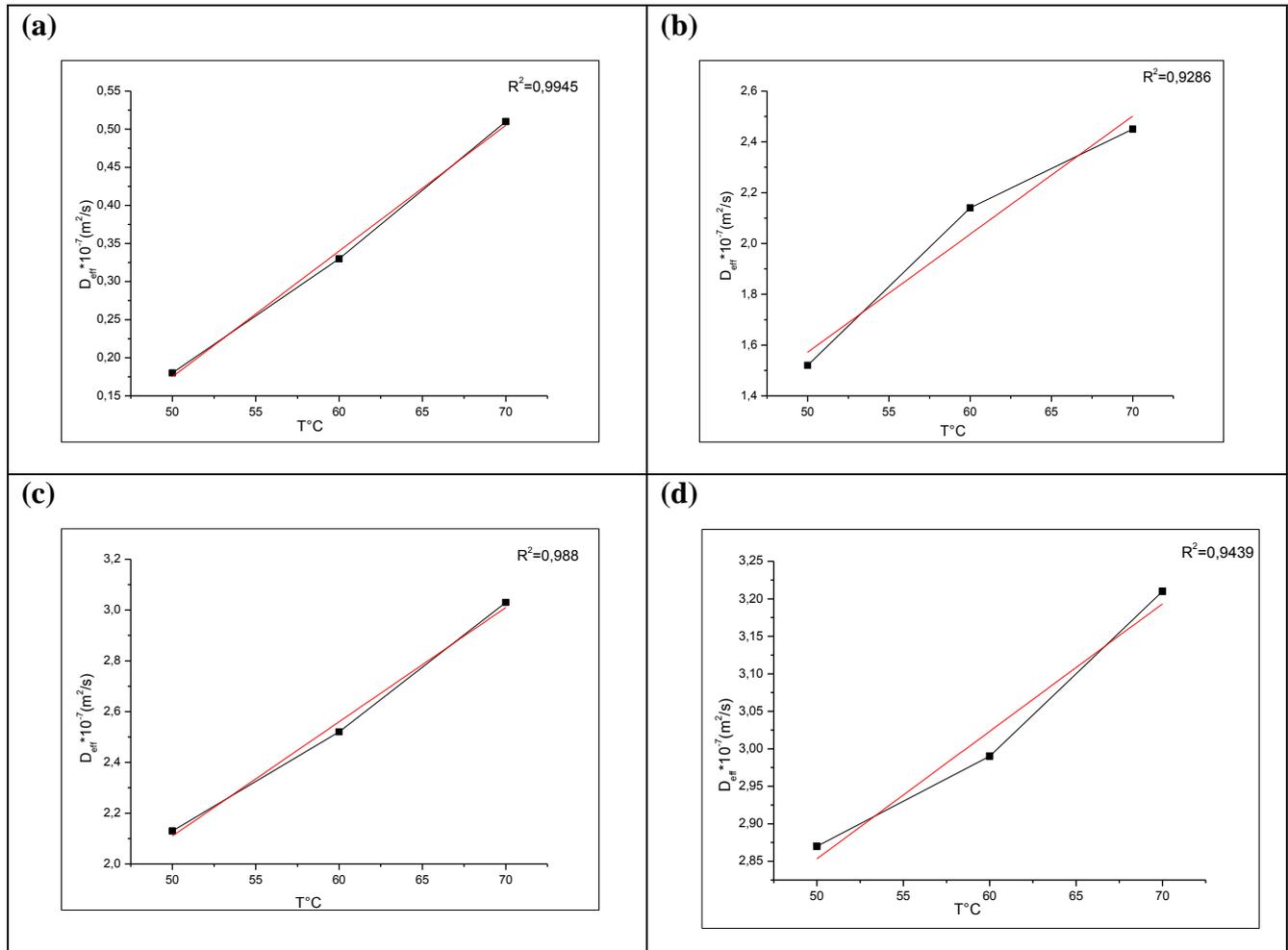


Figure 52: Diffusivité effective pendant le séchage par micro-ondes en fonction du temps de traitement: a) non traités, b) prétraités à 10min, c) à 20min et d) à 30min.

3.2. Propriétés physico-chimique des arilles séchés

3.2.1. Couleur

La légèreté (L^*), la rougeur (positive a^*) et le jaunissement (positif b^*) des arilles frais étaient respectivement de 32.27 ± 1.5 , 21.41 ± 1.3 et 7.80 ± 2.6 . Les changements de la couleur des arilles séchés par les deux méthodes sont présentés dans les figures 53 et 54.

Il y avait des effets significatifs de la méthode de séchage, de la température et du prétraitement sur la couleur ($P \leq 0,05$).

Le séchage a entraîné une augmentation dans L^* , a^* et b^* . Il a été observé que la couleur des arilles séchés par convection était plus foncée par rapport à la couleur des arilles séchés par micro-onde combiné à l'air chaud. Par conséquent, les valeurs de a^* et de b^* pour les arilles secs étaient plus élevées que pour les arilles brutes.

Ces changements de la couleur qui se produisent dans les fruits pendant le processus du séchage sont généralement liés à des réactions de brunissement qui peuvent être soit enzymatiques soit non enzymatiques (Bozkir et al., 2019). Arikan et al., (2012); ont rapporté que le séchage

provoquait une augmentation de la rougeur du produit qui était un indicateur des réactions de brunissement. Ils ont également déclaré que le séchage par micro-ondes entraînait moins des réactions de brunissement par rapport au séchage convectif.

Le séchage par micro-ondes prétraité par ultrasons a mieux protégé la couleur des arilles par rapport au séchage convectif (un long temps de séchage modifie les valeurs de la couleur du produit).

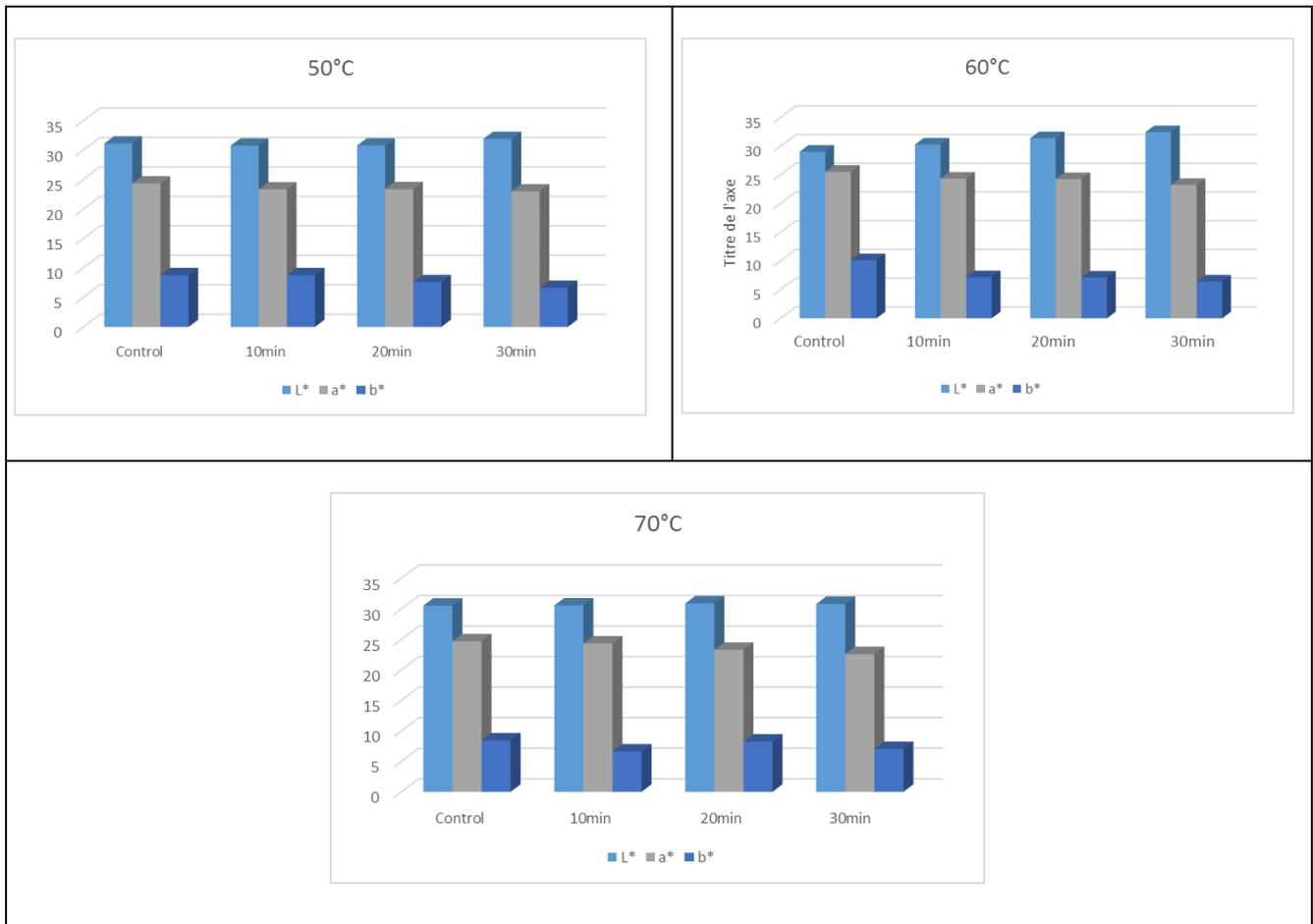


Figure 53: Couleur des arilles séchés par micro-onde assisté à l'air chaud et aux différents temps de traitement par ultrasons.

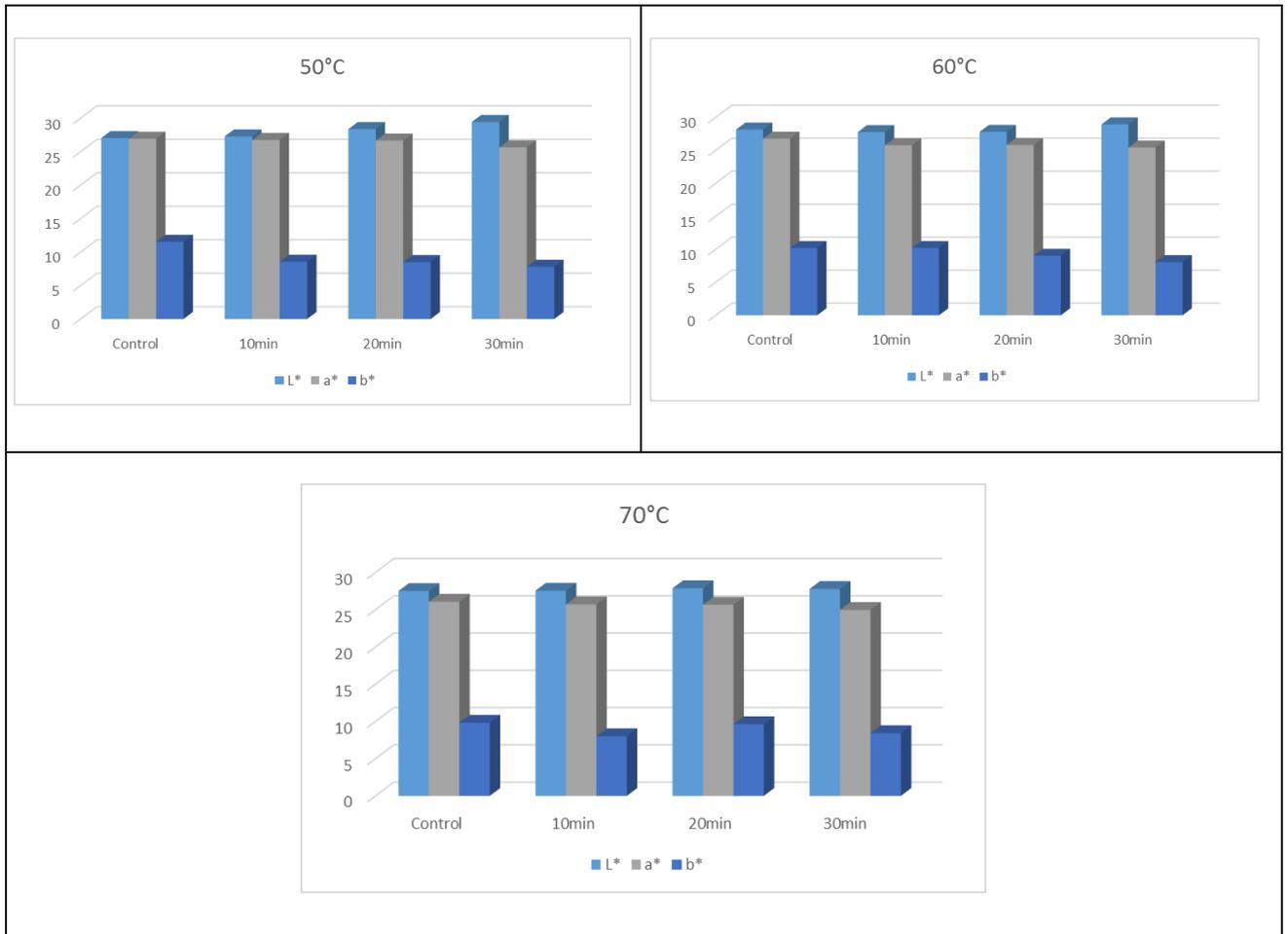


Figure 54: Couleur des arilles séchés par convection et aux différents temps de traitement par ultrasons.

3.2.2. Images MEB

Des micrographies électroniques à balayage des arilles traités par ultrasons sont présentées sur la figure 55, qui montre clairement une différence notable entre les morphologies des échantillons non traités et traités.

L'analyse de la microstructure montre que les cellules de la peau des arilles présentent des morphologies normales, avec des parois minces avant le traitement par ultrasons (Figure 55b).

Pendant le traitement par ultrasons, les cellules ont également été aplaties et allongées pour former des micro-canaux. Les micro-canaux ont été formés par la perturbation des tissus due aux forces de cisaillement résultant de l'effondrement des bulles lors de la cavitation (**Rani et Tripathy, 2019**). Avec l'augmentation du temps d'exposition aux ondes ultrasonores, le degré de dommage cellulaire a également été intensifié, comme on peut le voir sur la figure 55 (e). Le même effet a été observé chez les ananas (**Pirce et al., 2020**).

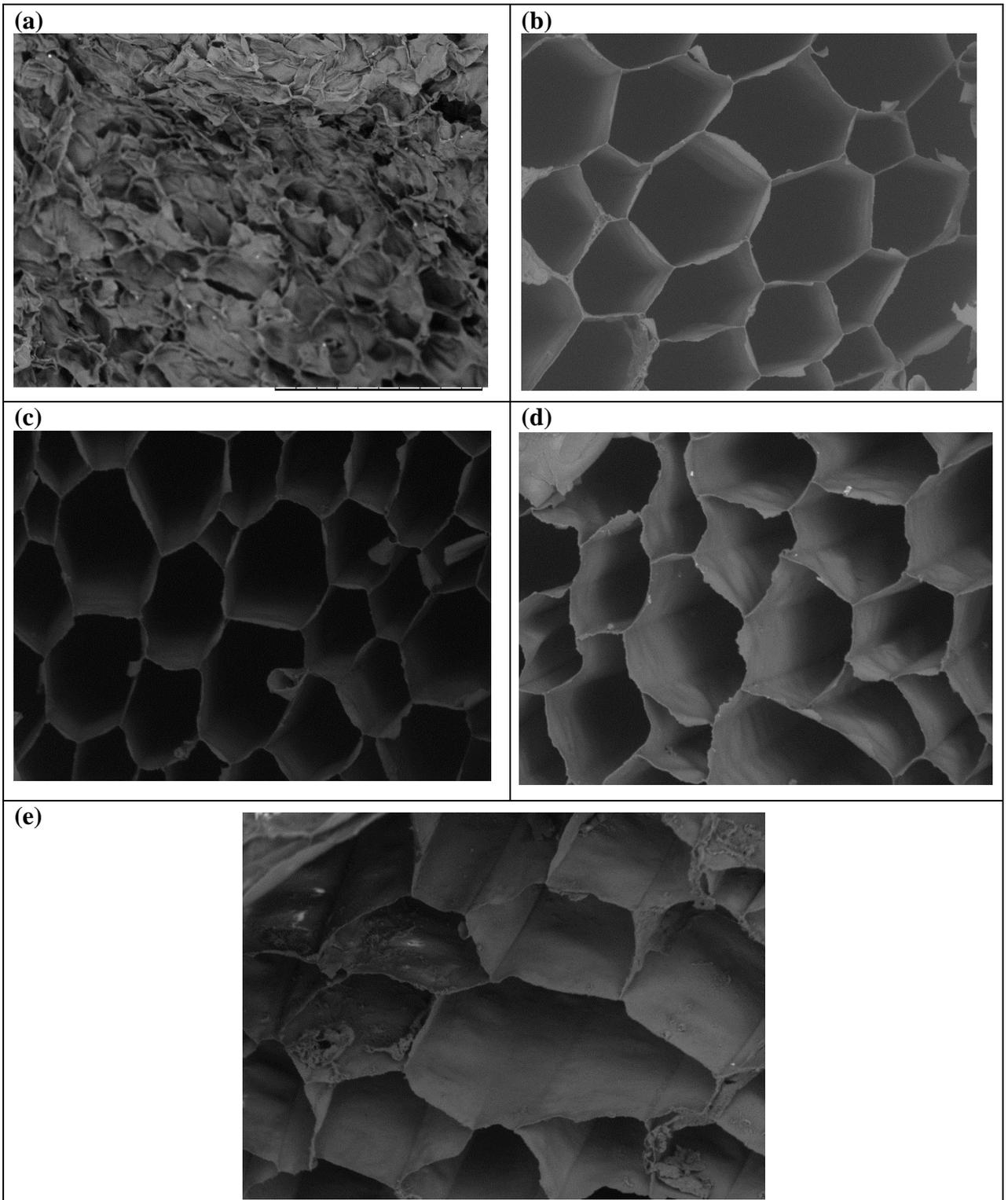


Figure 55: Images microscopiques des arilles de grenade: a) non traités, b) congelés-décongelés, c) prétraité à 10min, d) prétraité à 20min et e) prétraité à 30min.

3.2.3. Texture

Les techniques du séchage ont provoqué des changements dans le profil de la texture du produit alimentaire en raison du changement de la forme, de la taille et des propriétés mécaniques de l'échantillon (Rani etTripathy, 2019).

L'effet de la méthode du séchage, du prétraitement et de la température sur la dureté des arilles est indiqué dans la figure 56. En général, les arilles séchées par convection étaient généralement plus durs que les arilles séchées par micro-ondes. De plus; l'augmentation de la température du séchage a augmenté la dureté des arilles.

La dureté des arilles séchés non traité a été trouvée plus élevée que celle des arilles séchés prétraités. La dureté des arilles frais est de $19.130 \pm 5,63$ N, qui a été considérablement augmenté jusqu'à $54.1 \pm 11,79$ N après le séchage par convection à 70°C pour les arilles non traités.

La rupture de la membrane cellulaire au cours du prétraitement de l'échantillon par ultrasons rend plus tendre qui a empêché le durcissement des échantillons au cours du séchage (**Rani et Tripathy, 2019**). **Arikan et al., (2012)**; ont rapporté que les carottes séchées par micro-ondes étaient plus molles que les carottes séchées par convection.

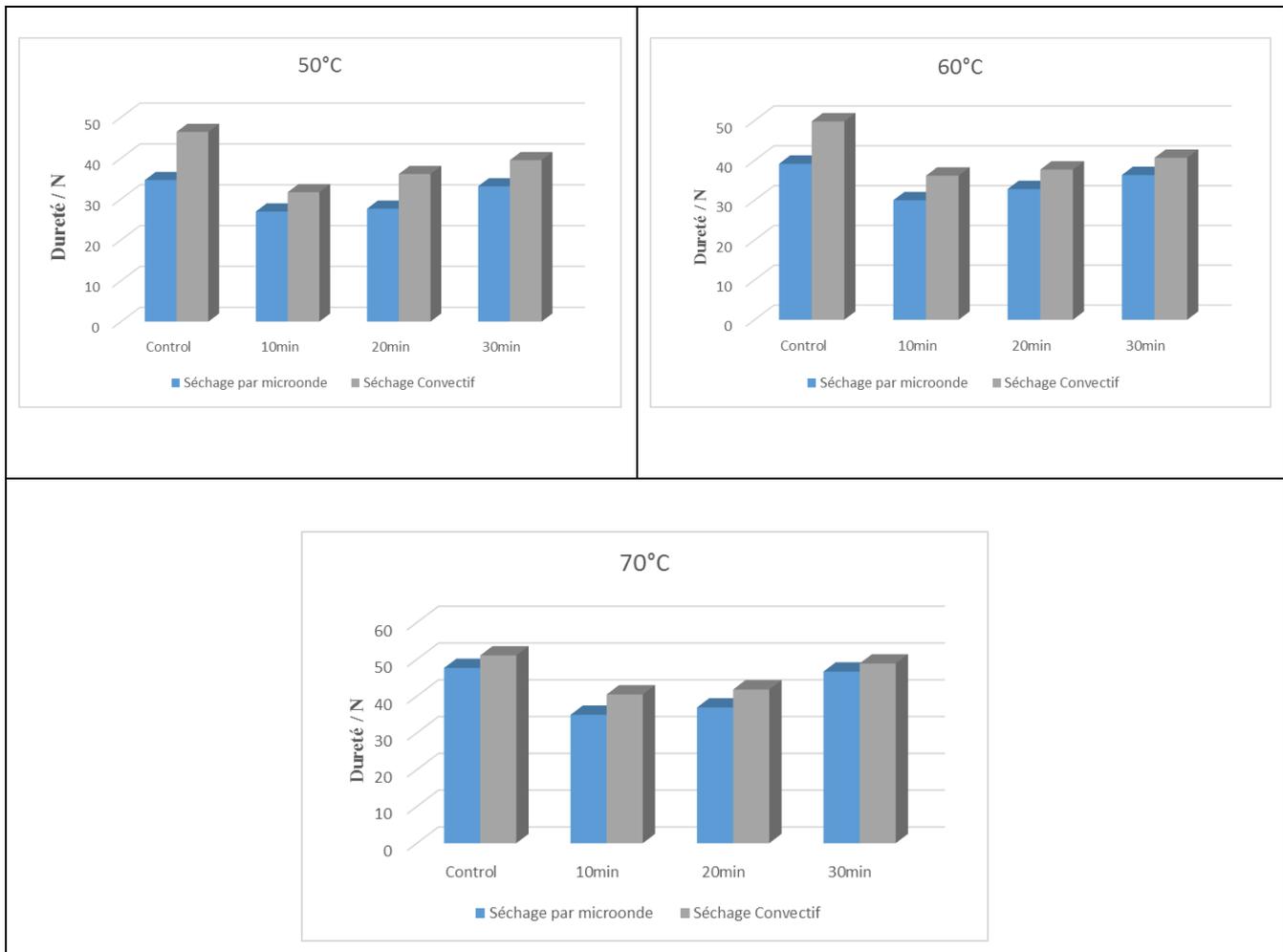


Figure 56: Dureté des arilles de la grenade séchées par les deux méthodes et aux différentes températures et aux différents temps de traitement par ultrasons.

3.2.4. Phénoliques totaux

Les composés phénoliques totaux ont tendance à diminuer à mesure que la température du séchage augmente. La teneur totale en composés phénoliques des arilles séchés aux différentes conditions est indiquée dans la figure 57.

Comme montre la figure 57, le processus du séchage a provoqué une perte significative de la teneur totale en phénols, en particulier à des températures élevées. La teneur en polyphénols des arilles séchées à une température inférieure était supérieure à celle des arilles séchées à une température plus élevée.

La teneur totale en phénol variait de 1454.01 à 3446.54mg GAE/kg MS. La concentration la plus élevée des composés phénoliques a été détectée dans les arilles séchées à 50°C par micro-onde combiné à l'air chaud et prétraités par ultrasons à 30min, tandis que la teneur la plus faible a été trouvée dans les arilles non traités séchés par convection à 70°C.

Les composés phénoliques sont sensibles au processus thermique et peuvent être facilement dégradés pendant le processus du séchage, en particulier à haute température et à long terme. Le séchage par micro-onde assisté à l'air chaud a permis de réduire le temps et donc diminuer la dégradation des polyphénols. Des résultats similaires ont également été rapportés par (Tekin et Baslar, 2018).

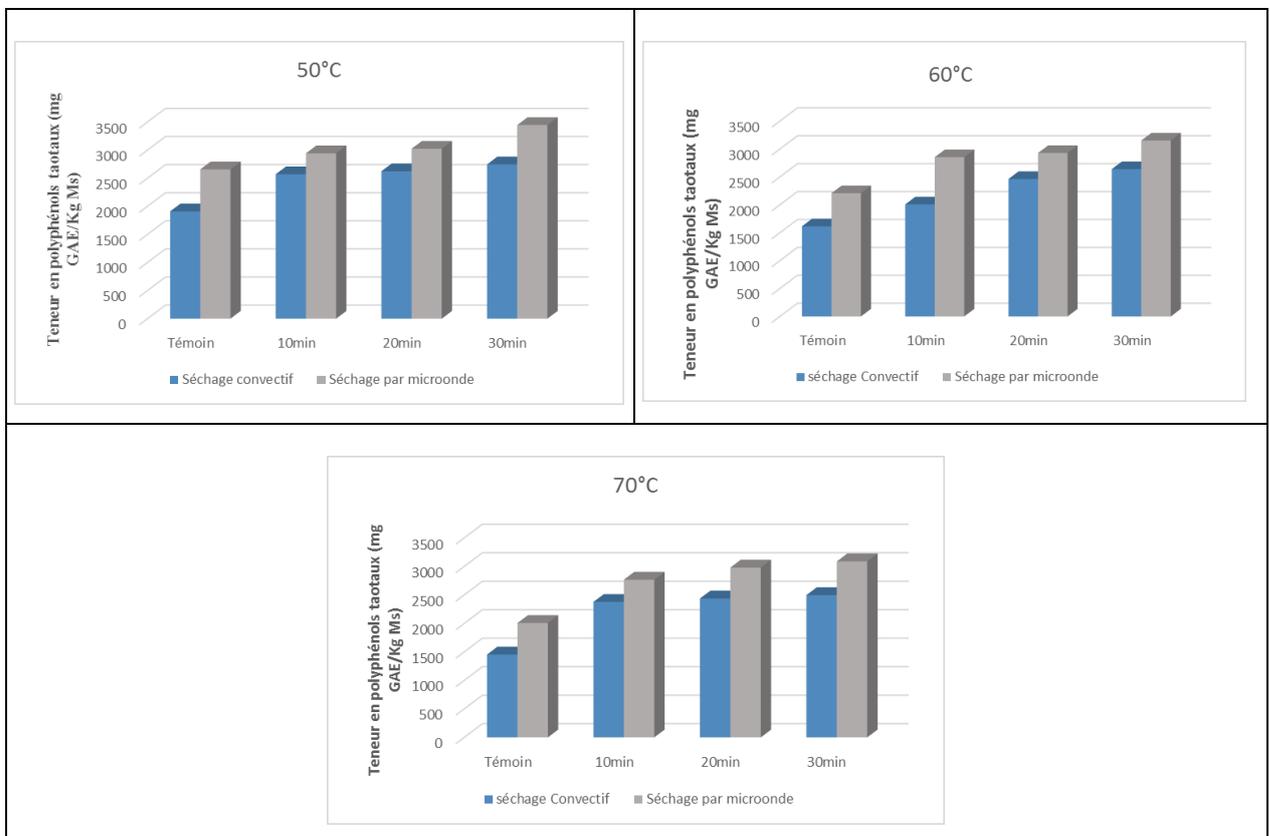


Figure 57: Contenu des composés phénoliques totaux dans les arilles de la grenade séchés par les deux méthodes, aux différentes températures et au différent temps de traitement ultrasons.

3.2.5. Capacité antioxydante

Les activités antioxydantes des fruits sont principalement liées à leurs composés phénoliques (Pirce *et al.*, 2020).

La capacité de piégeage des radicaux libres DPPH des arilles séchées est indiquée dans la figure 58.

L'activité antioxydante des arilles séchées a diminué que la température augmentait. La valeur la plus faible a été obtenue avec le séchage convectif à 70°C (0.57 mg Trolox g⁻¹). Tandis que la valeur la plus élevée a été obtenue avec le séchage par micro-onde assisté à l'air chaud à 50°C (0.75 mg Trolox g⁻¹).

Il y a une différence significative dans l'activité antioxydante a été trouvée entre les arilles traités et non traités par ultrasons ($P < 0,05$). Ainsi, le prétraitement par ultrasons devrait être le meilleur moyen de préserver les nutriments pendant le séchage en raison de sa capacité à réduire la période de séchage.

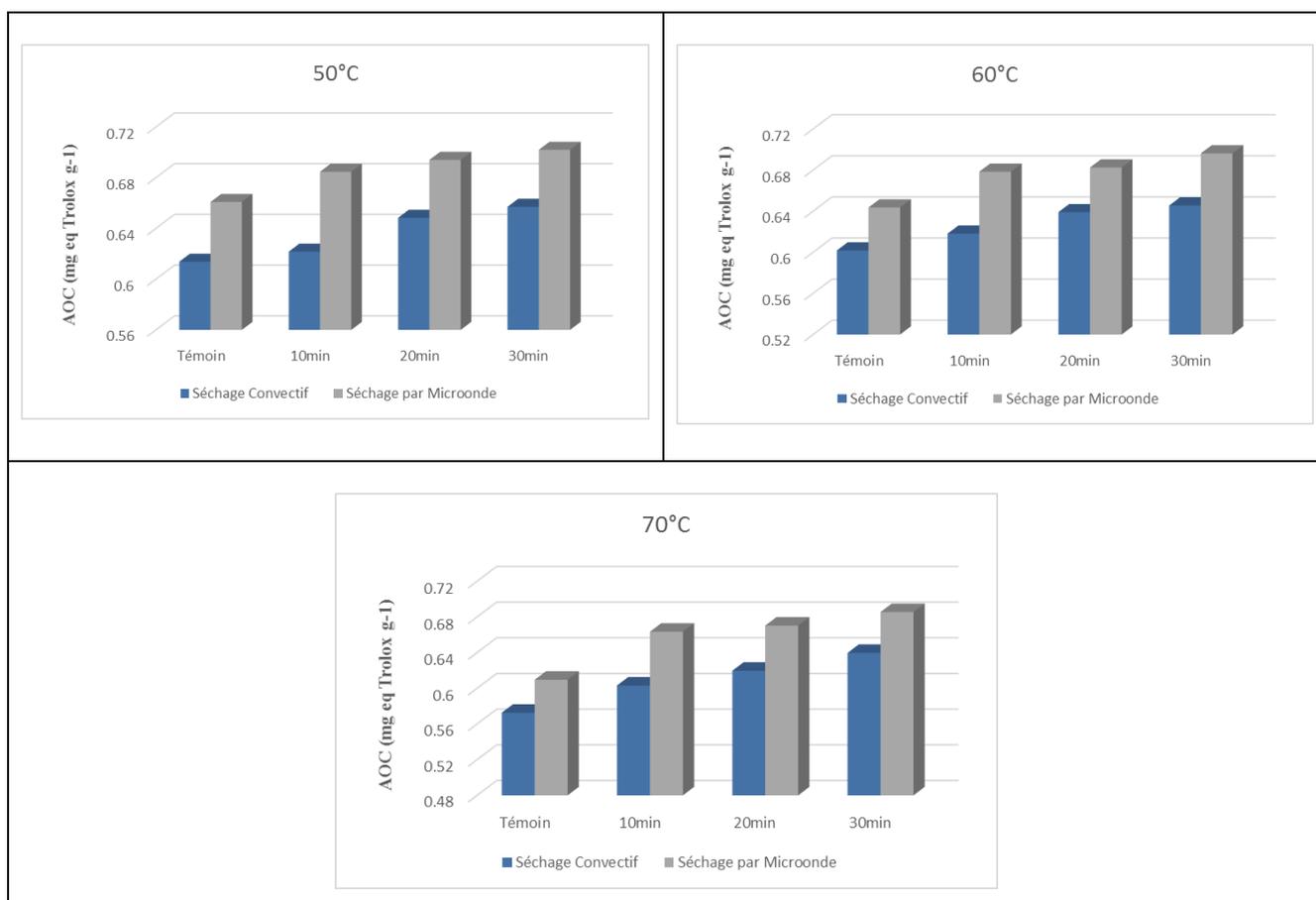


Figure 58: Capacité antioxydante des arilles de la grenade séchées par les deux méthodes et aux différentes températures et aux différents temps de traitement par ultrasons.

4. Conclusion

L'influence du prétraitement par ultrasons sur les caractéristiques du séchage convectif et par micro-ondes assisté à l'air chaud et sur les attributs de la qualité des arilles de la grenade a été étudiée.

Afin d'obtenir un gain de temps et une haute qualité, ces méthodes (ultrasons) pourraient être combinées avec les méthodes du séchage. En résumé, les ultrasons ont eu un effet significatif sur l'accélération de la vitesse du séchage des arilles. Il a également été constaté que le prétraitement par ultrasons améliorerait le transfert de masse pendant le séchage en raison de la formation des micro-canaux.

Les résultats ont mis en évidence que les arilles prétraités avec ultrasons à 30min avaient la vitesse du séchage la plus élevée et une meilleure diffusion de l'humidité pendant le séchage par rapport à celle des arilles prétraités à 10 et 20min et non prétraités aux ultrasons.

Le séchage par micro-ondes était meilleur que le séchage par convection en termes du temps de séchage et de la qualité des arilles séchés. Ces derniers s'est également avéré être de couleur plus brillante et de texture plus douce que les arilles séchés par convection.

Le comportement de séchage des arilles prétraités et non prétraités a été mieux interprété par le modèle de séchage logarithmique et Midilli *et al.*, (2002).

Conclusion générale

Conclusion

Dans le cadre de cette thèse, la conservation de la grenade de la région d'Ain Touta wilaya de Batna, Algérie, par les différentes méthodes; la chaleur et par le froid, est étudiée afin d'améliorer sa durée de conservation.

La première partie porte sur la caractérisation pomologique, physico-chimique, l'identification biologique, la quantification des polyphénols et l'évaluation de l'activité antioxydante du cultivar de la grenade dont les principaux résultats sont:

- ✓ La portion comestible de la grenade est de 57,51% du poids total du fruit.
- ✓ Les arilles ont donné une teneur en eau de 80,58 % et 19,42% de matière sèche.
- ✓ Le jus des arilles a montré des teneurs élevées en anthocyanes ($490.4 \pm 4,2$ mg/L).
- ✓ Les polyphénols totaux; les quantités totales variaient de 390.4 ± 2.4 mg/100ml.
- ✓ De plus, le jus des arilles de la grenade possède une activité antioxydante très élevée ($188,7 \pm 3,9$ mg/L).
- ✓ Les arilles ont une couleur rouge.
- ✓ Les quantités des minéraux K, Na, Mg et Ca sont les plus élevés dans le fruit.

La deuxième partie s'intéresse à l'étude des effets de la température de stockage au froid sur les propriétés physico-chimiques de la grenade. Comme résultats conclus sont;

- ✓ Les fruits de la grenade, endémiques aux climats subtropicaux, ne peuvent pas simplement être stockés à basse température, en raison du risque des blessures par le froid.
- ✓ Les blessures dues au froid se caractérisent par le brunissement de l'écorce du fruit et de l'arille. Cette condition limite l'acceptabilité des consommateurs.
- ✓ Les fruits de la grenade présentaient une bonne stabilité en ce qui concerne leur capacité antioxydante pendant le stockage au froid, sous réfrigération pendant des périodes plus courtes, avec peu de perte de leurs propriétés antioxydantes.
- ✓ En revanche, il y a eu des pertes importantes des anthocyanes, probablement dues à des réactions d'oxydation et/ou de condensation avec d'autres composés phénoliques.
- ✓ Les résultats de cette étude indiquent que la qualité nutritionnelle des fruits reste stable à une durée de conservation prolongée qui, dans certains cas, dépasse même quatre semaines.
- ✓ Une température de 0 à 3°C et une humidité relative de 85 à 90% devraient permettre une période du stockage prolongée.

Conclusion

La troisième partie s'intéresse à l'étude de l'effet des techniques de séchage sur arilles de la grenade. Comme conclusion:

- ✓ Le séchage pourrait être une bonne option pour réduire la quantité de l'eau.
- ✓ La composition chimique, les propriétés physiques et les attributs sensoriels des arilles ont été significativement affectés par leur déshydratation.
- ✓ En général, la réduction importante en polyphénols totaux et l'activité antioxydante ont été associés au processus de séchage.
- ✓ Les différentes méthodes du séchage ont des effets différents non seulement sur le temps du séchage, mais également sur la qualité des produits.

La quatrième partie s'intéresse à l'étude des effets des prétraitements par CEP et par ultrasons sur le séchage des arilles de la grenade

- ✓ Le traitement par champ électrique pulsé (CEP) est une nouvelle méthode de prétraitement non thermique qui préserve les aliments avec une excellente qualité sensorielle, nutritionnelle et longue durée de vie.
- ✓ Les membranes des arilles de la grenade ont été significativement affectées par le traitement CEP. En revanche, l'application du CEP sur les arilles de la grenade par une série d'impulsions très courtes caractérisées par une intensité du champ électrique élevée provoque l'électroporation.
- ✓ Il a été démontré dans cette étude que l'augmentation de la force du champ électrique jusqu'à 1,5 kV/cm entraînait une augmentation de l'indice de désintégration cellulaire.
- ✓ Le CEP s'est révélé améliorer la diffusion interne et entraîner une augmentation du taux de séchage. L'application du prétraitement par CEP réduit non seulement le temps du séchage, mais contribue également à maintenir la qualité des arilles.
- ✓ L'évaluation de l'influence du prétraitement ultrasonique combiné au séchage convectif et par micro-ondes assisté à l'air chaud, sur le temps du séchage et la qualité des arilles de la grenade a été étudié.
- ✓ Les arilles ont été soumis à un prétraitement par ultrasonique de 0, 10, 20 et 30 min à 40 kHz et séchés à 50, 60 et 70°C.
- ✓ En ce qui concerne les images de microscopie électronique à balayage (SEM), il a été constaté que le prétraitement en particulier avec un temps de 30min amélioré la porosité des arilles.
- ✓ Le prétraitement par ultrasons a réduit le temps du séchage sans entraîner une altération qualitative dans les arilles.

Conclusion

- ✓ Les résultats ont montré que la vitesse du séchage après les prétraitements par CEP et par ultrasons était significativement plus élevée que celle des arilles non prétraités.

La grenade de la région de Batna possède une meilleure qualité; cependant des recherches supplémentaires sont encore nécessaires pour faire la classification de cette vérité.

Références Bibliographique

- Adak N., Heybeli N. et Ertekin C., (2017).** Infrared drying of strawberry. *Food Chem*, 219, 109-116.
- Ade-Omowaye B. I. O., Angersbach A., Eshtiaghi N.M., et Knorr D., (2000).** Impact of high intensity electric field pulses on cell permeabilisation and as pre-processing step in coconut processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 1, 203-209.
- Ade-Omowaye B.I.O., Angersbach A., Taiwo K.A., et Knorr D., (2001).** Use of pulsed electric field pre-treatment to improve dehydration characteristics of plant based foods. *Trends in Food Science & Technology*, 12, 285-295.
- Adedeji A.A., Gachovska T.K., Ngadi M.O. et Raghavan G.S.V., (2008).** Effect of Pretreatments on Drying Characteristics of Okra. *Drying Technology*, 26, 1251-1256.
- Adiletta G., Petriccione M., Liguori L., Zampella L., Mastrobuoni F. et Di Matteo M., (2019).** Overall quality and antioxidant enzymes of ready-to-eat 'Purple Queen' pomegranate arils during cold storage. *Postharvest Biology and Technology*, 155, 20-28.
- Afolabi T.J., Tunde-Akintunde T.Y. et Adeyanju J.A., (2015).** Mathematical modeling of drying kinetics of untreated and pretreated cocoyam slices. *J Food Sci Technol*, 52, 2731-40.
- Aghbashlo M., (2016).** Exergetic simulation of a combined infrared-convective drying process. *Heat and Mass Transfer*, 52, 829-844.
- Aghdam M.S., Luo Z., Li L., Jannatizadeh A., Fard J.R. et Pirzad F., (2020).** Melatonin treatment maintains nutraceutical properties of pomegranate fruits during cold storage. *Food Chemistry*, 303, 125385.
- Ahmed I., Qazi I.M., et Jamal S., (2016).** Developments in osmotic dehydration technique for the preservation of fruits and vegetables. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 34, 29-43.
- Alabi K.P., Zhu Z., et Sun D.W., (2020).** Transport phenomena and their effect on microstructure of frozen fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology*, 101, 63-72.
- Alara O.R., Abdurahman N.H., et Olalere O.A., (2019).** Mathematical modelling and morphological properties of thin layer oven drying of Vernonia amygdalina leaves. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 18, 309-315.
- Alcaraz-Mármol F., Nuncio-Jáuregui N., García-Sánchez F., Martínez-Nicolás J.J. et Hernández F., (2017).** Characterization of twenty pomegranate (*Punica granatum* L.) cultivars grown in Spain: Aptitudes for fresh consumption and processing. *Scientia Horticulturae*, 219, 152-160.
- Alles M.C., Smetana S., Parniakov O., Shorstkii I., Toepfl S., Aganovic K. et Heinz V., (2020).** Bio-refinery of insects with Pulsed electric field pre-treatment. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 64, 102403.
- Al-Maiman S.A., et Ahmad D., (2002).** Changes in physical and chemical properties during pomegranate (*Punica granatum* L.) fruit maturation. *Food Chemistry*, 76, 437-441.
- Amri Z., Zaouay F., Lazreg-Aref H., Soltana H., Mneri A., Mars M., et Hammami M., (2017).** Phytochemical content, Fatty acids composition and antioxidant potential of different pomegranate parts: Comparison between edible and non edible varieties grown in Tunisia. *International Journal of Biological Macromolecules*, 104, 274-280.

- Andreou V., Dimopoulos G., Dermesonlouoglou E., et Taoukis P., (2020).** Application of pulsed electric fields to improve product yield and waste valorization in industrial tomato processing. *Journal of Food Engineering*, 270.
- AOAC, (1990).** Official Methods of Analysis, 15th edn. (Association of Official Analytical Chemists, Washington DC)
- Aral S. et Beşe 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.
- Arikan M.F., Ayhan Z., Soysal Y. et Esturk O., (2012).** Drying Characteristics and Quality Parameters of Microwave-Dried Grated Carrots. *Food and Bioprocess Technology*, 5, 3217-3229.
- Aste N., Del Pero C., et Leonforte F., (2017).** Active refrigeration technologies for food preservation in humanitarian context – A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 22, 150-160.
- AYADI M., MABROUK S.B., ZOUARI I. et BELLAGI A., 2014.** Kinetic study of the convective drying of spearmint. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 13, 1-7.
- Barba F.J., Parniakov O., Pereira S.A., Wiktor A., Grimi N., Boussetta N., Saraiva J.A., Raso J., Martin-Belloso O., Witrowa-Rajchert D., Lebovka N. et Vorobiev E., (2015).** Current applications and new opportunities for the use of pulsed electric fields in food science and industry. *Food Research International*, 77, 773-798.
- Barman K., Asrey R. et Pal R. K. (2011).** Putrescine and carnauba wax pretreatments alleviate chilling injury, enhance shelf life and preserve pomegranate fruit quality during cold storage. *Scientia Horticulturae*, 130, 795-800.
- Başlar M., Toker Ö. S., Karasu S., Tekin Z. H., et Biranger Yildirim H., (2016).** Ultrasonic Applications for Food Dehydration. In *Handbook of Ultrasonics and Sonochemistry*, 1247-1270. Singapore: Springer Singapore.
- Bazhal M., Lebovka N. et Vorobiev E., (2003).** Optimisation of Pulsed Electric Field Strength for Electroporation of Vegetable Tissues. *Biosystems Engineering*, 86, 339-345.
- Bchir B., Besbes S., Karoui R., Attia H., Paquot M. et Blecker C., (2010).** Effect of Air Drying Conditions on Physico-chemical Properties of Osmotically Pre-treated Pomegranate Seeds. *Food and Bioprocess Technology*, 5, 1840-1852.
- Bchir B., Besbes S., Karoui R., Attia H., Paquot M. et Blecker C., (2012).** Effect of Air Drying Conditions on Physico-chemical Properties of Osmotically Pre-treated Pomegranate Seeds. *Food and Bioprocess Technology*, 5, 1840-1852.
- Behera G. et Sutar P.P., (2018).** A comprehensive review of mathematical modeling of paddy parboiling and drying: Effects of modern techniques on process kinetics and rice quality. *Trends in Food Science & Technology*, 75, 206-230.
- Beigi M., (2017).** Thin layer drying of wormwood (*Artemisia absinthium* L.) leaves: dehydration characteristics, rehydration capacity and energy consumption. *Heat and Mass Transfer*, 53, 2711-2718.
- Belay Z.A., Caleb O.J. et Opara U.L., (2017).** Impacts of low and super-atmospheric oxygen

concentrations on quality attributes, phytonutrient content and volatile compounds of minimally processed pomegranate arils (cv. Wonderful). *Postharvest Biology and Technology*, 124, 119-127.

Blahovec J., Vorobiev E., et Lebovka N., (2017). Pulsed Electric Fields Pretreatments for the Cooking of Foods. *Food Engineering Reviews*, 9, 71-81.

Boussaa F., Zaouay F., Hernandez F., Noguera-Artiaga L., Carbonell-Barrachina A., Melgarejo P. et Mars M., (2018). Cropping system contributes largely to fruit composition and sensory properties of pomegranate (*Punica granatum* L. var. Gabsi). *South African Journal of Botany*, 115, 170-178.

Bozkir H., Rayman Ergün A., Tekgül Y. et Baysal T., (2019). Ultrasound as pretreatment for drying garlic slices in microwave and convective dryer. *Food Science and Biotechnology*, 28, 347-354.

Brandão R.J., Borel L.D.M.S., Marques L.G. et Prado M.M., (2016). Heat and Mass Transfer, Energy and Product Quality Aspects in Drying Processes Using Infrared Radiation. In *Drying and Energy Technologies*, eds. J. M. P. Q. Delgado & A. G. Barbosa de Lima, 111-130. Cham: Springer International Publishing.

Briki S., Zitouni B., Bechaa B. et Amiali M., (2019). Comparison of convective and infrared heating as means of drying pomegranate arils (*Punica granatum* L.). *Heat and Mass Transfer*.

Bruce DM, (1985). Exposed layer barley drying, three models fitted to new data up to 150 °C. *J Agric Engr Res* 32:337-47.

Cano-Lamadrid M., Lech K., Michalska A., Wasilewska M., Figiel A., Wojdyło A. et Carbonell-Barrachina A., (2017). Influence of osmotic dehydration pre-treatment and combined drying method on physico-chemical and sensory properties of pomegranate arils, cultivar Mollar de Elche. *Food Chemistry*, 232, 306-315.

Calín-Sánchez Á., Figiel A., Hernández F., Melgarejo P., Lech K. et Carbonell Barrachina Á.A., (2013). Chemical Composition, Antioxidant Capacity, and Sensory Quality of Pomegranate (*Punica granatum* L.) Arils and Rind as Affected by Drying Method. *Food and Bioprocess Technology*, 6, 1644-1654.

Calín-Sánchez Á., Figiel A., Szarycz M., Lech K., Nuncio-Jáuregui N. et Carbonell Barrachina Á.A., (2014). Drying Kinetics and Energy Consumption in the Dehydration of Pomegranate (*Punica granatum* L.) Arils and Rind. *Food and Bioprocess Technology*, 7, 2071-2083.

Calín-Sánchez Á., Figiel A., Hernández F., Melgarejo P., Lech K., Carbonell-Barrachina Á.A., (2013). Chemical composition, antioxidant capacity, and sensory quality of pomegranate (*Punica granatum* L.) arils and rind as affected by drying method. *Food Bioprocess Technol* 6:1644-1654

Cano-Lamadrid M., Lech K., Michalska A., Wasilewska M., Figiel A., Wojdyło A. et Carbonell-Barrachina A. A., (2017). Influence of osmotic dehydration pre-treatment and combined drying method on physico-chemical and sensory properties of pomegranate arils, cultivar Mollar de Elche. *Food Chem*, 232, 306-315.

Cao,X., Cai C., Wang Y. et Zheng X., (2018). The inactivation kinetics of polyphenol oxidase and peroxidase in bayberry juice during thermal and ultrasound treatments. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 45, 169-178.

- Carmona L., Alquézar B., Marques V.V. et Peña L., (2017).** Anthocyanin biosynthesis and accumulation in blood oranges during postharvest storage at different low temperatures. *Food Chemistry*, 237, 7-14.
- Castañeda-Ovando A., Pacheco-Hernández M.d.L., Páez-Hernández M.E., Rodríguez J.A. et Galán-Vidal C.A., (2009).** Chemical studies of anthocyanins: A review. *Food Chemistry*, 113, 859-871.
- Castro A.M., Mayorga E.Y. et Moreno F.L., (2018).** Mathematical modelling of convective drying of fruits: A review. *Journal of Food Engineering*, 223, 152-167.
- Chauhan O. P., Sayanfar S., et Toepfl S., (2018).** Effect of pulsed electric field on texture and drying time of apple slices. *Journal of Food Science and Technology*, 55, 2251-2258.
- Chen N.N., Chen M.Q., Fu B.A. et Song J.J., (2017).** Far-infrared irradiation drying behavior of typical biomass briquettes. *Energy*, 121, 726-738.
- Chen Q., Bi J., Wu X., Yi J., Zhou L. et Zhou Y., (2015).** Drying kinetics and quality attributes of jujube (*Zizyphus jujuba* Miller) slices dried by hot-air and short- and medium wave infrared radiation. *LWT - Food Science and Technology*, 64, 759-766.
- Chua L.Y.W., Chong C.H., Chua B.L., et Figiel A., (2019).** Influence of Drying Methods on the Antibacterial, Antioxidant and Essential Oil Volatile Composition of Herbs: a Review. *Food and Bioprocess Technology*, 12, 450-476.
- Ciurzyńska A., Kowalska H., Czajkowska K., et Lenart A., (2016).** Osmotic dehydration in production of sustainable and healthy food. *Trends in Food Science & Technology*, 50, 186-192.
- Chauhan P.S. et Kumar A., (2018).** Thermal modeling and drying kinetics of gooseberry drying inside north wall insulated greenhouse dryer. *Applied Thermal Engineering*, 130, 587-597.
- Chater J.M., Merhaut D.J., Jia Z., Mauk P.A. et Preece J.E., (2018).** Fruit quality traits of ten California-grown pomegranate cultivars harvested over three months. *Scientia Horticulturae*, 237, 11-19.
- Cao X., Zhang M., Mujumdar A. S., Zhong Q. et Wang Z., (2018).** Effects of ultrasonic pretreatments on quality, energy consumption and sterilization of barley grass in freeze drying. *Ultrasonics Sonochemistry*, 40, 333-340.
- Dak M., Jaaffrey S.N.A. et Gupta R.B., (2014).** Moisture-dependent physical properties of dried pomegranate arils. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 8, 234-240.
- Dak M., Jain M.K. et Jat S.L., (2014).** Optimization of microwave-vacuum drying of pomegranate arils. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 8, 398-411.
- Dak M. et Pareek N.K., (2014).** Effective moisture diffusivity of pomegranate arils under going microwave-vacuum drying. *Journal of Food Engineering*, 122, 117-121.
- Dak M., Sagar V.R. et Jha S.K., (2014).** Shelf-life and kinetics of quality change of dried pomegranate arils in flexible packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 2, 1-6.
- DASH, K., GOPE, S., SETHI, A. & DOLOI, M. 2013.** Study on thin layer drying characteristics star fruit slices. *International Journal Agriculture and Food Science Technology*, 4, 679-686.
- Dash K, Gope S, Sethi A, Doloi M, (2013).** Study on thin layer drying characteristics star fruit slices. *International Journal Agriculture and Food Science Technology* 4:679–686

- Demiray E., Seker A. et Tulek Y., (2017).** Drying kinetics of onion (*Allium cepa* L.) slices with convective and microwave drying. *Heat and Mass Transfer*, 53, 1817-1827.
- Dermesonlouoglou E., Chalkia A., Dimopoulos G. et Taoukis P., (2018).** Combined effect of pulsed electric field and osmotic dehydration pre-treatments on mass transfer and quality of air dried goji berry. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 49, 106-115.
- Demir V.Ã, Gunhan T, Yagcioglu AK, (2007).** Mathematical modeling of convection drying of green table olives. *Biosyst Engr* 98:47–53
- Dev S.R.S., Padmini T., Adedeji A., Gariépy Y. et Raghavan G.S.V., (2008).** A Comparative Study on the Effect of Chemical, Microwave, and Pulsed Electric Pretreatments on Convective Drying and Quality of Raisins. *Drying Technology*, 26, 1238-1243.
- De Oliveira Carvalho J. et Orlanda J.F.F., (2017).** Heat stability and effect of pH on enzyme activity of polyphenol oxidase in buriti (*Mauritia flexuosa* Linnaeus f.) fruit extract. *Food Chemistry*, 233, 159-163.
- Derakhshan Z., Ferrante M., Tadi M., Ansari F., Heydari A., Hosseini M. S., Conti G. O. et Sadrabad E. K., (2018).** Antioxidant activity and total phenolic content of ethanolic extract of pomegranate peels, juice and seeds. *Food and Chemical Toxicology*, 114, 108-111.
- Dehghannya J., Hosseinlar S.H., et Heshmati M.K., (2018).** Multi-stage continuous and intermittent microwave drying of quince fruit coupled with osmotic dehydration and low temperature hot air drying. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 45, 132-151.
- Dibagar N., Kowalski S.J., Chayjan R.A. et Figiel A., (2020).** Accelerated convective drying of sunflower seeds by high-power ultrasound: Experimental assessment and optimization approach. *Food and Bioproducts Processing*, 123, 42-59.
- Doymaz İ., (2004).** Pretreatment effect on sun drying of mulberry fruits (*Morus alba* L.). *Journal of Food Engineering*, 65, 205-209.
- Doymaz İ., (2011).** Experimental study on drying characteristics of pomegranate peels. *Food Science and Biotechnology*, 20, 965-970.
- Doymaz İ., (2011).** Drying of Pomegranate Arils and Selection of a Suitable Drying Model. *Food Biophysics*, 6, 461-467.
- (2012a).** Drying of pomegranate seeds using infrared radiation. *Food Science and Biotechnology*, 21, 1269-1275.
- (2012b).** Prediction of Drying Characteristics of Pomegranate Arils. *Food Analytical Methods*, 5, 841-848.
- Doymaz, İ., S. Karasu & M. Baslar (2016)** Effects of infrared heating on drying kinetics, antioxidant activity, phenolic content, and color of jujube fruit. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 10, 283-291.
- Diamanti A.C., Igoumenidis P.E., Mourtzinis I., Yannakopoulou K. et Karathanos V.T., (2017).** Green extraction of polyphenols from whole pomegranate fruit using cyclodextrins. *Food Chemistry*, 214, 61-66.
- Du J., Gao L., Yang Y., Guo S., Chen J., Omran M., et Chen G., (2020).** Modeling and kinetics study of microwave heat drying of low grade manganese ore. *Advanced Powder Technology*.

- Duan Y., Wang G.B., Fawole O.A., Verboven P., Zhang X.R., Wu D., Opara U.L., Nicolai B., et Chen K., (2020).** Postharvest precooling of fruit and vegetables: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 100, 278-291.
- EL-BELTAGY A., GAMEA G.R. et ESSA A.H.A., 2007.** Solar drying characteristics of strawberry. *Journal of Food Engineering*, 78, 456-464.
- El Kantar S., Boussetta N., Lebovka N., Foucart F., Rajha H.N., Maroun R.G., Louka N. et Vorobiev E., (2018).** Pulsed electric field treatment of citrus fruits: Improvement of juice and polyphenols extraction. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 46, 153-161.
- Ergün K., Çalışkan G. et Dirim S.N., (2016).** Determination of the drying and rehydration kinetics of freeze dried kiwi (*Actinidia deliciosa*) slices. *Heat and Mass Transfer*, 52, 2697-2705.
- Ersus S. et Barrett D.M., (2010).** Determination of membrane integrity in onion tissues treated by pulsed electric fields: Use of microscopic images and ion leakage measurements. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 11, 598-603.
- Esturk O., (2012).** Intermittent and Continuous Microwave-Convective Air-Drying Characteristics of Sage (*Salvia officinalis*) Leaves. *Food and Bioprocess Technology*, 5, 1664-1673.
- Fawole O.A., Atukuri J., Arendse E. et Opara U.O., (2020).** Postharvest physiological responses of pomegranate fruit (cv. Wonderful) to exogenous putrescine treatment and effects on physico-chemical and phytochemical properties. *Food Science and Human Wellness*.
- Fawole O.A. et Opara U.L., (2013).** Effects of storage temperature and duration on physiological responses of pomegranate fruit. *Industrial Crops and Products*, 47, 300-309.
- Fawole O.A. et Opara U.L., (2013).** Developmental changes in maturity indices of pomegranate fruit: A descriptive review. *Scientia Horticulturae*, 159, 152-161.
- Fauster T., Giancaterino M., Pittia P. et Jaeger H., (2020).** Effect of pulsed electric field pretreatment on shrinkage, rehydration capacity and texture of freeze-dried plant materials. *LWT*, 121, 108937.
- Fernandes F. A. N., Rodrigues S., Cárcel J. A. et García-Pérez J. V., (2015).** Ultrasound-Assisted Air-Drying of Apple (*Malus domestica* L.) and Its Effects on the Vitamin of the Dried Product. *Food and Bioprocess Technology*, 8, 1503-1511.
- Fernandes L., Pereira J.A., López-Cortés I., Salazar D.M., Ramalhosa E., et Casal S., (2015).** Fatty acid, vitamin E and sterols composition of seed oils from nine different pomegranate (*Punica granatum* L.) cultivars grown in Spain. *Journal of Food Composition and Analysis*, 39, 13-22.
- Fernandes F. A. N., Braga T. R., Silva E. O. et Rodrigues S., (2019).** Use of ultrasound for dehydration of mangoes (*Mangifera indica* L.): kinetic modeling of ultrasound-assisted osmotic dehydration and convective air-drying. *Journal of Food Science and Technology*, 56, 1793-1800.
- Fonteles T.V., Leite A.K., Silva A. R., Carneiro A. P., Miguel Ede C., Cavada B. S., Fernandes F. A. et Rodrigues S., (2016).** Ultrasound processing to enhance drying of cashew apple bagasse puree: Influence on antioxidant properties and in vitro bioaccessibility of bioactive compounds. *Ultrason Sonochem*, 31, 237-49.
- Gachovska T. K., Adedeji A.A., Ngadi M., et Raghavan G.V.S., (2008).** Drying Characteristics of Pulsed Electric Field-Treated Carrot. *Drying Technology*, 26, 1244-1250.

- Galaz P., Valdenegro M., Ramírez C., Nuñez H., Almonacid S. et Simpson R., (2017).** Effect of drum drying temperature on drying kinetic and polyphenol contents in pomegranate peel. *Journal of Food Engineering*, 208, 19-27.
- Ghasemi A. et Chayjan R.A., (2018).** Optimization of Pelleting and Infrared-Convection Drying Processes of Food and Agricultural Waste Using Response Surface Methodology (RSM). *Waste and Biomass Valorization*.
- Glouannec P., Lecharpentier D. et Noel H., (2002).** Experimental survey on the combination of radiating infrared and microwave sources for the drying of porous material. *Applied Thermal Engineering*, 22, 1689-1703.
- Giteru S.G., Oey I., et Ali M.A., (2018).** Feasibility of using pulsed electric fields to modify biomacromolecules: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 72, 91-113.
- González-Sosa J., Ruiz-Vargas A., Arias G. et Ivorra A., (2014).** Fast flow-through non-thermal pasteurization using constant radiofrequency electric fields. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 22, 116-123.
- Gudmundsson M., et Hafsteinsson H., (2001).** Effect of electric field pulses on microstructure of muscle foods and roes. *Trends in Food Science & Technology*, 12, 122-128.
- González-Sosa J., Ruiz-Vargas A., Arias G. et Ivorra A., (2014).** Fast flow-through non-thermal pasteurization using constant radiofrequency electric fields. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 22, 116-123.
- Hasan Masud M., Karim A., Ananno A.A., et Ahmed A., (2020).** Sustainable Drying Techniques for Developing Countries. In *Sustainable Food Drying Techniques in Developing Countries: Prospects and Challenges*, eds. M. Hasan Masud, A. Karim, A. A. Ananno & A. Ahmed, 81-168. Cham: Springer International Publishing.
- Hashim N, Daniel O, Rahaman E, (2014).** A preliminary study: kinetic model of drying process of pumpkins (*Cucurbita Moschata*) in a convective hot air dryer. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 2:345–352
- Hammouda I. et Mihoubi D., (2014).** Comparative numerical study of kaolin clay with three drying methods: Convective, convective–microwave and convective infrared modes. *Energy Conversion and Management*, 87, 832-839.
- HASHIM N., DANIEL O. et RAHAMAN E., (2014).** A Preliminary Study: Kinetic Model of Drying Process of Pumpkins (*Cucurbita Moschata*) in a Convective Hot Air Dryer. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2, 345-352.
- Hmid I., Hanine H., Elothmani D. et Oukabli A., (2018).** The physico-chemical characteristics of Moroccan pomegranate and evaluation of the antioxidant activity for their juices. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17, 302-309.
- Horuz E. et Maskan M., (2013).** Hot air and microwave drying of pomegranate (*Punica granatum L.*) arils. *Journal of Food Science and Technology*, 52, 285-293.
- Huang W., Feng Z., Aila R., Hou Y., Carne A. et Bekhit A.E.D.A., (2019).** Effect of pulsed electric fields (PEF) on physico-chemical properties, β -carotene and antioxidant activity of air-dried apricots. *Food Chemistry*, 291, 253-262.
- Huang D., Men K., Li D., Wen T., Gong Z., Sunden B., et Wu Z., (2020).** Application of ultrasound technology in the drying of food products. *Ultrasonics Sonochemistry*, 63, 104950.

- Horuz E., Bozkurt H., Karataş H. et Maskan M., (2017).** Effects of hybrid (microwave-convectonal) and convectonal drying on drying kinetics, total phenolics, antioxidant capacity, vitamin C, color and rehydration capacity of sour cherries. *Food Chemistry*, 230, 295-305.
- (2018) Simultaneous application of microwave energy and hot air to whole drying process of apple slices: drying kinetics, modeling, temperature profile and energy aspect. *Heat and Mass Transfer*, 54, 425-436.
- Horuz E. et Maskan M., (2015).** Hot air and microwave drying of pomegranate (*Punica granatum* L.) arils. *Journal of Food Science and Technology*, 52, 285-293.
- Horuz E. et Maskan M., (2015).** Hot air and microwave drying of pomegranate (*Punica granatum* L.) arils. *Journal of Food Science and Technology*, 52, 285-293.
- Huang W., Feng Z., Aila R., Hou Y., Carne A. et Bekhit A.E.D.A., (2019).** Effect of pulsed electric fields (PEF) on physico-chemical properties, β -carotene and antioxidant activity of air-dried apricots. *Food Chemistry*, 291, 253-262.
- Jalté M., Lanoisellé J.L., Lebovka N.I. et Vorobiev E., (2009).** Freezing of potato tissue pre-treated by pulsed electric fields. *LWT - Food Science and Technology*, 42, 576-580.
- Jannatizadeh A., (2019).** Exogenous melatonin applying confers chilling tolerance in pomegranate fruit during cold storage. *Scientia Horticulturae*, 246, 544-549.
- Jalté M., Lanoisellé J.-L., Lebovka N. I. et Vorobiev E., (2009).** Freezing of potato tissue pre-treated by pulsed electric fields. *LWT - Food Science and Technology*, 42, 576-580.
- Jia Y., Khalifa I., Hu L., Zhu W., Li J., Li K. et Li C., (2019).** Influence of three different drying techniques on persimmon chips' characteristics: A comparison study among hot-air, combined hot-air-microwave, and vacuum-freeze drying techniques. *Food and Bioprocess Technology*, 118, 67-76
- Kalaycioglu Z. et Erim F.B., (2017).** Total phenolic contents, antioxidant activities, and bioactive ingredients of juices from pomegranate cultivars worldwide. *Food Chem*, 221, 496-507.
- Karimi M., Sadeghi R. et Kokini J., (2017).** Pomegranate as a promising opportunity in medicine and nanotechnology. *Trends in Food Science & Technology*, 69, 59-73.
- KAUR K. et SINGH A., (2014).** Drying kinetics and quality characteristics of beetroot slices under hot air followed by microwave finish drying. *African Journal of Agricultural Research*, 9, 1036-1044.
- Karimi M., Sadeghi R. et Kokini J., (2017).** Pomegranate as a promising opportunity in medicine and nanotechnology. *Trends in Food Science & Technology*, 69, 59-73.
- Kaveh M., Abbaspour-Gilandeh Y., Chayjan R. A., Taghinezhad E. et Mohammadigol R., (2018).** Mass transfer, physical, and mechanical characteristics of terebinth fruit (*Pistacia atlantica* L.) under convective infrared microwave drying. *Heat and Mass Transfer*, 54, 1879-1899.
- Keneni Y.G., Hvoslef-Eide A.K. et Marchetti J.M., (2019).** Mathematical modelling of the drying kinetics of *Jatropha curcas* L. seeds. *Industrial Crops and Products*, 132, 12-20.
- Khadivi, A., F. Mirheidari, Y. Moradi et S. Paryan (2020)** Morphological variability of wild pomegranate (*Punica granatum* L.) accessions from natural habitats in the Northern parts of Iran. *Scientia Horticulturae*, 264.

- Khan M., Imran H., Welsh Z., Gu Y., Karim M.A. et Bhandari B., (2020).** Modelling of simultaneous heat and mass transfer considering the spatial distribution of air velocity during intermittent microwave convective drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 153, 119668.
- Khodabakhshian R., et Abbaspour-Fard M.H., (2020).** Pattern recognition-based Raman spectroscopy for non-destructive detection of pomegranates during maturity. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 231.
- Khwairakpam A.D., Bordoloi D., Thakur K.K., Monisha J., Arfuso F., Sethi G., Mishra S., Kumar A.P., et Kunnumakkara A.B., (2018).** Possible use of Punica granatum (Pomegranate) in cancer therapy. *Pharmacological Research*, 133, 53-64.
- Komolafe C.A., Ojediran J.O., Ajao F.O., Dada O.A., Afolabi Y.T., Oluwaleye I.O. et Alake A.S., (2019).** Modelling of moisture diffusivity during solar drying of locust beans with thermal storage material under forced and natural convection mode. *Case Studies in Thermal Engineering*, 15, 100542.
- Koushesh Saba M., et Amini R., (2017).** Nano-ZnO/carboxymethyl cellulose-based active coating impact on ready-to-use pomegranate during cold storage. *Food Chemistry*, 232, 721-726.
- Kumar A.K., et Sharma S., (2017).** Recent updates on different methods of pretreatment of lignocellulosic feedstocks: a review. *Bioresources and Bioprocessing*, 4, 7.
- La Fuente C. I. A. et Tadini C. C., (2018).** Ultrasound pre-treatment prior to unripe banana air-drying: effect of the ultrasonic volumetric power on the kinetic parameters. *Journal of Food Science and Technology*, 55, 5098-5105.
- Laribi A.I., Palou L., Intrigliolo D.S., Nortés P.A., Rojas-Argudo C., Taberner V., Bartual J. et Pérez-Gago M.B., (2013).** Effect of sustained and regulated deficit irrigation on fruit quality of pomegranate cv. 'Mollar de Elche' at harvest and during cold storage. *Agricultural Water Management*, 125, 61-70.
- Lammerskitten A., Wiktor A., Siemer C., Toepfl S., Mykhailyk V., Gondek E., Rybak K., Witrowa-Rajchert D. et Parniakov O., (2019).** The effects of pulsed electric fields on the quality parameters of freeze-dried apples. *Journal of Food Engineering*, 252, 36-43.
- Lebovka N.I., Praporscic I. et Vorobiev E., (2004).** Effect of moderate thermal and pulsed electric field treatments on textural properties of carrots, potatoes and apples. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 5, 9-16.
- Lebovka N. I., Shynkaryk N. V. et Vorobiev E., (2007).** Pulsed electric field enhanced drying of potato tissue. *Journal of Food Engineering*, 78, 606-613.
- (2018b).** Effects of pulsed electric fields treatment on vacuum drying of potato tissue. *LWT*, 95, 289-294.
- Lechtańska J.M., Szadzińska J. et Kowalski S.J., (2015).** Microwave- and infrared-assisted convective drying of green pepper: Quality and energy considerations. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 98, 155-164.
- Lenaerts S., Van Der Borgh M., Callens A. et Van Campenhout L., (2018).** Suitability of microwave drying for mealworms (*Tenebrio molitor*) as alternative to freeze drying: Impact on nutritional quality and colour. *Food Chem*, 254, 129-136.
- Li B., et Sun D.W., (2002).** Novel methods for rapid freezing and thawing of foods – a review. *Journal of Food Engineering*, 54, 175-182.

- Li J., Li Z., Wang N., Raghavan G.S.V., Pei Y., Song C., et Zhu G., (2020).** Novel Sensing Technologies During the Food Drying Process. *Food Engineering Reviews*, 12, 121-148.
- Liu C., Grimi N., Lebovka N. et Vorobiev E., (2018).** Effects of pulsed electric fields treatment on vacuum drying of potato tissue. *LWT*, 95, 289-294.
- Liu C., Pirozzi A., Ferrari G., Vorobiev E. et Grimi N., (2020).** Effects of Pulsed Electric Fields on Vacuum Drying and Quality Characteristics of Dried Carrot. *Food and Bioprocess Technology*, 13, 45-52.
- Liu C., Grimi N., Lebovka N. et Vorobiev E., (2018a).** Effects of preliminary treatment by pulsed electric fields and convective air-drying on characteristics of fried potato. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 47, 454-460.
- Liu D.K., Xu C.C., Guo C.X., et Zhang X.X., (2020).** Sub-zero temperature preservation of fruits and vegetables: A review. *Journal of Food Engineering*, 275.
- Liu T., Burritt D.J. et Oey I., (2019).** Understanding the effect of Pulsed Electric Fields on multilayered solid plant foods: Bunching onions (*Allium fistulosum*) as a model system. *Food Research International*, 120, 560-567.
- Liu Z., Esveld E., Vincken J.P. et Bruins M.E., (2019).** Pulsed Electric Field as an Alternative Pre-treatment for Drying to Enhance Polyphenol Extraction from Fresh Tea Leaves. *Food and Bioprocess Technology*, 12, 183-192.
- Li Z., Raghavan G. S. V., Wang N. et Vigneault C., (2011).** Drying rate control in the middle stage of microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 104, 234-238.
- Liu Y., Zeng Y., Hu X. et Sun X., (2020).** Effect of Ultrasonic Power on Water Removal Kinetics and Moisture Migration of Kiwifruit Slices During Contact Ultrasound Intensified Heat Pump Drying. *Food and Bioprocess Technology*, 13, 430-441.
- Llavata B., García-Pérez J.V., Simal S., et Cárcel J.A., (2020).** Innovative pre-treatments to enhance food drying: a current review. *Current Opinion in Food Science*, 35, 20-26.
- López-Gámez G., Elez-Martínez P., Martín-Belloso O., et Soliva-Fortuny R., (2020).** Enhancing phenolic content in carrots by pulsed electric fields during post-treatment time: Effects on cell viability and quality attributes. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 59.
- Malekjani N. et Jafari S.M., (2018).** Simulation of food drying processes by Computational Fluid Dynamics (CFD); recent advances and approaches. *Trends in Food Science & Technology*, 78, 206-223.
- Martín-García B., Tylewicz U., Verardo V., Pasini F., Gómez-Caravaca A.M., Caboni M.F. et Dalla Rosa M., (2020).** Pulsed electric field (PEF) as pre-treatment to improve the phenolic compounds recovery from brewers' spent grains. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 64, 102402.
- Meighani H., Ghasemnezhad M. et Bakhshi D., (2015).** Effect of different coatings on post-harvest quality and bioactive compounds of pomegranate (*Punica granatum L.*) fruits. *Journal of Food Science and Technology*, 52, 4507-4514.
- Melgarejo P., Núñez-Gómez D., Legua P., Martínez-Nicolás J.J. et Almansa M.S., (2020).** Pomegranate (*Punica granatum L.*) a dry pericarp fruit with fleshy seeds. *Trends in Food Science & Technology*.

- Menon A., Stojceska V., et Tassou S.A., (2020).** A systematic review on the recent advances of the energy efficiency improvements in non-conventional food drying technologies. *Trends in Food Science & Technology*, 100, 67-76.
- Meziane Z.K., Elothmani D. et Benhadja L.B., (2015).** Morphological and physicochemical characteristics of three pomegranate cultivars (*Punica granatum* L.) grown in northern Algeria. *Fruits*, 71, 17-26.
- Midilli A, Kucuk H et Yapar Z., (2002).** A new model for single-layer drying. *Dry Technol* 20:1503–1513
- Mincuzzi A., Ippolito A., Montemurro C. et Sanzani S.M., (2020).** Characterization of *Penicillium* s.s. and *Aspergillus* sect. *nigri* causing postharvest rots of pomegranate fruit in Southern Italy. *International Journal of Food Microbiology*, 314, 108389.
- Morvaridzadeh M., Sepidarkish M., Daneshzad E., Akbari A., Mobini G.R., et Heshmati J., (2020).** The effect of pomegranate on oxidative stress parameters: A systematic review and meta-analysis. *Complementary Therapies in Medicine*, 48.
- Moses J.A., Norton T., Alagusundaram K., et Tiwari B.K., (2014).** Novel Drying Techniques for the Food Industry. *Food Engineering Reviews*, 6, 43-55.
- Musielak G., Mierzwa D., et Kroehnke J., (2016).** Food drying enhancement by ultrasound –A review. *Trends in Food Science & Technology*, 56, 126-141.
- Mphahlele R.R., Fawole O.A. et Opara U.L., (2016).** Influence of packaging system and long term storage on physiological attributes, biochemical quality, volatile composition and antioxidant properties of pomegranate fruit. *Scientia Horticulturae*, 211, 140-151.
- Mphahlele R. R., Fawole O.A., Makunga N.P. et Opara U.L., (2016).** Effect of drying on the bioactive compounds, antioxidant, antibacterial and antityrosinase activities of pomegranate peel. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 16, 143.
- Mphahlele R.R., Pathare P.B. et Opara U.L., (2019).** Drying kinetics of pomegranate fruit peel (cv. Wonderful). *Scientific African*, 5, e00145.
- Nadery Dehsheikh F. et Taghian Dinani S., (2019).** Coating pretreatment of banana slices using carboxymethyl cellulose in an ultrasonic system before convective drying. *Ultrasonics Sonochemistry*, 52, 401-413.
- Nasrabadi M., Ramezani A., Eshghi S., et Sarkhosh A., (2020).** Chilling and heat requirement of pomegranate (*Punica granatum* L.) trees grown under sustained deficit irrigation. *Scientia Horticulturae*, 263, 109117.
- Ni J., Ding C., Zhang Y. et Song Z., (2020).** Impact of different pretreatment methods on drying characteristics and microstructure of goji berry under electrohydrodynamic (EHD) drying process. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 61, 102318.
- Niamnuy C., Devahastin S., et Soponronnarit S., (2014).** Some recent advances in microstructural modification and monitoring of foods during drying: A review. *Journal of Food Engineering*, 123, 148-156.
- Nowacka M., Wiktor A., Anuszevska A., Dadan M., Rybak K. et Witrowa-Rajchert D., (2019).** The application of unconventional technologies as pulsed electric field, ultrasound and microwave-vacuum drying in the production of dried cranberry snacks. *Ultrasonics Sonochemistry*, 56, 1-13.

- Nowicka P., Wojdyło A., Lech K. et Figiel A., (2015).** Influence of Osmodehydration Pretreatment and Combined Drying Method on the Bioactive Potential of Sour Cherry Fruits. *Food and Bioprocess Technology*, 8, 824-836.
- Nuncio-Jáuregui N., Calín-Sánchez A., Carbonell-Barrachina A. et Hernández F., (2014).** Changes in quality parameters, proline, antioxidant activity and color of pomegranate (*Punica granatum* L.) as affected by fruit position within tree, cultivar and ripening stage. *Scientia Horticulturae*, 165, 181-189.
- Nuncio-Jáuregui N., Munera-Picazo S., Calín-Sánchez Á., Wojdyło A., Hernández F. et Carbonell-Barrachina Á.A., (2015).** Bioactive compound composition of pomegranate fruits removed during thinning. *Journal of Food Composition and Analysis*, 37, 11-19.
- Nuncio-Jáuregui N., Calín-Sánchez A., Carbonell-Barrachina A. et Hernández F., (2014).** Changes in quality parameters, proline, antioxidant activity and color of pomegranate (*Punica granatum* L.) as affected by fruit position within tree, cultivar and ripening stage. *Scientia Horticulturae*, 165, 181-189.
- O'Grady L., Sigge G., Caleb O.J. et Opara U.L., (2014).** Effects of storage temperature and duration on chemical properties, proximate composition and selected bioactive components of pomegranate (*Punica granatum* L.) arils. *LWT - Food Science and Technology*, 57, 508-515.
- Omolola, A. O., P. F. Kapila & H. M. Silungwe (2019)** Mathematical modeling of drying characteristics of Jew's mallow (*Corchorus olitorius*) leaves. *Information Processing in Agriculture*, 6, 109-115.
- Onwude D.I., Hashim N., Abdan K., Janius R. et Chen G., (2018a).** Modelling the mid-infrared drying of sweet potato: kinetics, mass and heat transfer parameters, and energy consumption. *Heat and Mass Transfer*.
- Onwude D.I., Hashim N., Abdan K., Janius R., Chen G. et Kumar C., (2018b).** Modelling of coupled heat and mass transfer for combined infrared and hot-air drying of sweet potato. *Journal of Food Engineering*, 228, 12-24.
- Onwude D. I., Hashim N., Janius R.B., Nawi N.M. et Abdan K., (2016).** Modeling the Thin-Layer Drying of Fruits and Vegetables: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15, 599-618.
- Özdemir M.B., Aktaş M., Şevik S. et Khanlari A., (2017).** Modeling of a convective-infrared kiwifruit drying process. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 18005-18013.
- Opara L.U., Al-Ani M.R. et Al-Shuaibi Y.S., (2008).** Physico-chemical Properties, Vitamin C Content, and Antimicrobial Properties of Pomegranate Fruit (*Punica granatum* L.). *Food and Bioprocess Technology*, 2, 315-321.
- Ostermeier R., Giersemehl P., Siemer C., Töpfl S. et Jäger H., (2018).** Influence of pulsed electric field (PEF) pre-treatment on the convective drying kinetics of onions. *Journal of Food Engineering*, 237, 110-117.
- Overhults DG, White GM, Hamilton HE et Ross IJ., (1973).** Drying soybeans with heated air. *Trans ASAE* 16:112–113
- Page GE, (1949).** Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin-layers. M.S.Thesis, Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- Pankiewicz U., Góral M., Kozłowicz K., et Góral D., (2020).** Application of pulsed electric field in production of ice cream enriched with probiotic bacteria (*L. rhamnosus* B 442) containing intracellular calcium ions. *Journal of Food Engineering*, 275.

- Parlak N., (2014).** Fluidized bed drying characteristics and modeling of ginger (*zingiber officinale*) slices. *Heat and Mass Transfer*, 51, 1085-1095.
- Parniakov O., Lebovka N. I., Bals O. et Vorobiev E., (2015).** Effect of electric field and osmotic pre-treatments on quality of apples after freezing–thawing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 29, 23-30.
- Parniakov O., Bals O., Lebovka N. et Vorobiev E., (2016).** Pulsed electric field assisted vacuum freeze-drying of apple tissue. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 35, 52-57.
- Passafiume R., Perrone A., Sortino G., Gianguzzi G., Saletta F., Gentile C. et Farina V., (2019).** Chemical–physical characteristics, polyphenolic content and total antioxidant activity of three Italian-grown pomegranate cultivars. *NFS Journal*, 16, 9-14.
- Pashazadeh B., Elhamirad A.H., Hajnajari H., Sharayei P. et Armin M., (2020).** Optimization of the pulsed electric field -assisted extraction of functional compounds from cinnamon. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 23, 101461
- Piljac-Žegarac J., et Šamec D., (2011).** Antioxidant stability of small fruits in postharvest storage at room and refrigerator temperatures. *Food Research International*, 44, 345-350.
- Pirce F., Vieira T.M.F.S., Augusto-Obara T.R., Alencar S.M., Romero F. et Scheuermann E., (2020).** Effects of convective drying assisted by ultrasound and osmotic solution on polyphenol, antioxidant and microstructure of murtilla (*Ugni molinae* Turcz) fruit. *Journal of Food Science and Technology*.
- Pu H., Li Z., Hui J. et Raghavan G. S. V., (2016).** Effect of relative humidity on microwave drying of carrot. *Journal of Food Engineering*, 190, 167-175.
- Pu Y.-Y. et Sun D.-W., (2017).** Combined hot-air and microwave-vacuum drying for improving drying uniformity of mango slices based on hyperspectral imaging visualisation of moisture content distribution. *Biosystems Engineering*, 156, 108-119.
- Putnik P., Kresoja Ž., Bosiljkov T., Režek Jambrak A., Barba F. J., Lorenzo J. M., Roohinejad S., Granato D., Žuntar I., et Bursać Kovačević D., (2019).** Comparing the effects of thermal and non-thermal technologies on pomegranate juice quality: A review. *Food Chemistry*, 279.
- Raghavi L.M., Moses J. A. et Anandharamakrishnan C., (2018).** Refractance window drying of foods: A review. *Journal of Food Engineering*, 222, 267-275.
- Rajha H. N., Abi-Khattar A.-M., El Kantar S., Boussetta N., Lebovka N., Maroun R. G., Louka N. et Vorobiev E., (2019).** Comparison of aqueous extraction efficiency and biological activities of polyphenols from pomegranate peels assisted by infrared, ultrasound, pulsed electric fields and high-voltage electrical discharges. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 58, 102212.
- Rahaman A., Siddeeg A., Manzoor M.F., Zeng X.A., Ali S., Baloch Z., Li J., et Wen Q.H., (2019).** Impact of pulsed electric field treatment on drying kinetics, mass transfer, colour parameters and microstructure of plum. *Journal of Food Science and Technology*, 56, 2670-2678.
- Ramos K.K., Lessio B.C., Mecê A.L.B. et Efraim P., (2017).** Mathematical modeling of uvaia byproduct drying and evaluation of quality parameters. *Food Science and Biotechnology*, 26, 643-651.

- Ramachandran R. P., Akbarzadeh M., Paliwal J., et Cenkowski S., (2018).** Computational Fluid Dynamics in Drying Process Modelling—a Technical Review. *Food and Bioprocess Technology*, 11, 271-292.
- Rani P. et Tripathy P. P., (2019).** Effect of ultrasound and chemical pretreatment on drying characteristics and quality attributes of hot air dried pineapple slices. *Journal of Food Science and Technology*, 56, 4911-4924.
- Reque P.M., Steffens R.S., Jablonski A., Flôres S.H., Rios A.d.O. et de Jong E.V., (2014).** Cold storage of blueberry (*Vaccinium* spp.) fruits and juice: Anthocyanin stability and antioxidant activity. *Journal of Food Composition and Analysis*, 33, 111-116.
- Sabarez H., (2016).** Drying of Food Materials.
- Sacilik K., (2007).** Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (*Cucurbita pepo* L.). *J Food Eng* 79:23–30
- Sason G. et Nussinovitch A., (2020).** Selective protective coating for damaged pomegranate arils. *Food Hydrocolloids*, 103, 105647.
- Sagar V.R., et Suresh Kumar P., (2010).** Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. *Journal of Food Science and Technology*, 47, 15-26.
- Sayyari M., Aghdam M.S., Salehi F. et Ghanbari F., (2016).** Salicyloyl chitosan alleviates chilling injury and maintains antioxidant capacity of pomegranate fruits during cold storage. *Scientia Horticulturae*, 211, 110-117.
- Sharma S., Pradhan R., Manickavasagan A., et Dutta A., (2020).** Characterization of ultrasonic-treated corn crop biomass using imaging, spectral and thermal techniques: a review. *Biomass Conversion and Biorefinery*.
- Silva E.S., Roohinejad S., Koubaa M., Barba F.J., Jambrik A.R., Vukušić T., Santos M.D., Queirós R.P. et Saraiva J.A., (2016).** Effect of Pulsed Electric Fields on Food Constituents. In *Handbook of Electroporation*, ed. D. Miklavcic, 1-19. Cham: Springer International Publishing.
- Singh B., Singh J.P., Kaur A., et Singh N., (2018).** Phenolic compounds as beneficial phytochemicals in pomegranate (*Punica granatum* L.) peel: A review. *Food Chemistry*, 261, 75-86.
- Singh P., et Gaur M.K., (2020).** A Review on Role of Solar Drying Technology in Sustainable Development. In *Intelligent Computing Applications for Sustainable Real-World Systems*, eds. M. Pandit, L. Srivastava, R. Venkata Rao & J. C. Bansal, 18-27. Cham: Springer International Publishing.
- Süfer Ö. et Palazoğlu T.K., (2019).** A study on hot-air drying of pomegranate. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 137, 1981-1990.
- Sudhakar Rao D.V. et Shivashankara K. S., (2018).** Effect of modified atmosphere packaging on the extension of storage life and quality maintenance of pomegranate (cv. 'Bhagwa') at ambient and low temperatures. *Journal of Food Science and Technology*, 55, 2103-2113.
- Sitzmann W., Vorobiev E., et Lebovka N., (2016).** Applications of electricity and specifically pulsed electric fields in food processing: Historical backgrounds. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 37, 302-311.

- Tekin Z. H. et Baslar M., (2018).** The effect of ultrasound-assisted vacuum drying on the drying rate and quality of red peppers. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 132, 1131-1143.
- Teixeira da Silva J. A., Rana T. S., Narzary D., Verma N., Meshram D.T., et Ranade S.A., (2013).** Pomegranate biology and biotechnology: A review. *Scientia Horticulturae*, 160, 85-107.
- Thamkaew G. et Gómez Galindo F., (2020).** Influence of pulsed and moderate electric field protocols on the reversible permeabilization and drying of Thai basil leaves. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 64, 102430.
- TOĞRUL İ.T. et PEHLIVAN D., (2002).** Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering*, 55, 209-216.
- Toğrul H., (2006).** Suitable drying model for infrared drying of carrot. *Journal of Food Engineering*, 77, 610-619.
- Toğrul İT, Pehlivan D., (2002).** Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers. *J Food Eng* 55:209–216
- Vaessen E. M. J., den Besten H.M.W., Patra T., van Mossevelde N.T.M., Boom R.M., et Schutyser M.A.I., (2018).** Pulsed electric field for increasing intracellular trehalose content in *Lactobacillus plantarum* WCFS1. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 47, 256-261.
- Varasteh F., Arzani K., Barzegar M. et Zamani Z., (2012).** Changes in anthocyanins in arils of chitosan-coated pomegranate (*Punica granatum* L. cv. Rabbab-e-Neyriz) fruit during cold storage. *Food Chemistry*, 130, 267-272.
- VEGA A., URIBE E., LEMUS R. et MIRANDA M., (2007).** Hot-air drying characteristics of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) and influence of temperature on kinetic parameters. *LWT - Food Science and Technology*, 40, 1698-1707.
- Velickova E., Tylewicz U., Dalla Rosa M., Winkelhausen E., Kuzmanova S. et Romani S., (2018).** Effect of pulsed electric field coupled with vacuum infusion on quality parameters of frozen/thawed strawberries. *Journal of Food Engineering*, 233, 57-64.
- Venkitasamy C., Zhu C., Brandl M.T., Niederholzer F.J.A., Zhang R., McHugh T.H. et Pan Z., (2018).** Feasibility of using sequential infrared and hot air for almond drying and inactivation of *Enterococcus faecium* NRRL B-2354. *LWT*, 95, 123-128.
- Vera Zambrano M., Dutta B., Mercer D.G., MacLean H.L., et Touchie M.F., (2019).** Assessment of moisture content measurement methods of dried food products in small-scale operations in developing countries: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 88, 484-496.
- Viuda-Martos M., Fernández-López J. et Pérez-Álvarez J.A., (2010).** Pomegranate and its Many Functional Components as Related to Human Health: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 9, 635-654.
- Vorobiev, E. & N. Lebovka. 2008.** Pulsed-Electric-Fields-Induced Effects in Plant Tissues: Fundamental Aspects and Perspectives of Applications. In *Electrotechnologies for Extraction from Food Plants and Biomaterials*, 39-81. New York, NY: Springer New York.
- Vorobiev E., et Lebovka N., (2011).** Pulse Electric Field-Assisted Extraction. *Enhancing Extraction Processes in the Food Industry*, 25-84.

- Vorobiev E., et Lebovka N., (2013).** Enhancing Extraction from Solid Foods and Biosuspensions by Electrical Pulsed Energy (Pulsed Electric Field, Ohmic Heating, and High-Voltage Electrical Discharge). In *Advances in Food Process Engineering Research and Applications*, eds. S. Yanniotis, P. Taoukis, N. G. Stoforos & V. T. Karathanos, 415-428. Boston, MA: Springer US.
- Vorobiev E. et Lebovka N., (2020).** Drying. In *Processing of Foods and Biomass Feedstocks by Pulsed Electric Energy*, eds. E. Vorobiev & N. Lebovka, 149-177. Cham: Springer International Publishing.
- WANG C. et SINGH R.P., (1978).** USE OF VARIABLE EQUILIBRIUM MOISTURE CONTENT IN MODELING RICE DRYING. *Paper-American Society of Agricultural Engineers*.
- Wang M.S., Wang L.H., Bekhit A.E.D.A., Yang J., Hou Z.P., Wang Y.Z., Dai Q.Z. et Zeng X.A., (2018).** A review of sublethal effects of pulsed electric field on cells in food processing. *Journal of Food Engineering*, 223, 32-41.
- Wang C, Singh RP., (1978).** Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. *Trans Am Soc Agric Eng* 11:668–672
- Wiktor A., Dadan M., Nowacka M., Rybak K. et Witrowa-Rajchert D., (2019).** The impact of combination of pulsed electric field and ultrasound treatment on air drying kinetics and quality of carrot tissue. *LWT*, 110, 71-79.
- Xu X., Zhang L., Feng Y., ElGasim A., Yagoub A., Sun Y., Ma H. et Zhou C., (2020).** Vacuum pulsation drying of okra (*Abelmoschus esculentus* L. Moench): Better retention of the quality characteristics by flat sweep frequency and pulsed ultrasound pretreatment. *Food Chemistry*, 326, 127026.
- Yadav A.K., et Singh S.V., (2014).** Osmotic dehydration of fruits and vegetables: a review. *Journal of Food Science and Technology*, 51, 1654-1673.
- Younis M., Abdelkarim D. et Zein El-Abdein A., (2018).** Kinetics and mathematical modeling of infrared thin-layer drying of garlic slices. *Saudi J Biol Sci*, 25, 332-338.
- ZaouayF., Mena P., Garcia-Viguera C. et Mars M., (2012).** Antioxidant activity and physico-chemical properties of Tunisian grown pomegranate (*Punica granatum* L.) cultivars. *Industrial Crops and Products*, 40, 81-89.
- ZENOOZIAN M.S., FENG H., RAZAVI S., SHAHIDI F., et POURREZA H., (2008).** Image analysis and dynamic modeling of thin-layer drying of osmotically dehydrated pumpkin. *Journal of food processing and preservation*, 32, 88-102.
- Zenoozian MS, Feng H, Razavi S, Shahidi F. et Pourreza H., (2008).** Image analysis and dynamic modeling of thin-layer drying of osmotically dehydrated pumpkin. *J Food ProcessPreserv* 32:88–102
- Zielinska M. et Michalska A., (2016).** Microwave-assisted drying of blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) fruits: Drying kinetics, polyphenols, anthocyanins, antioxidant capacity, colour and texture. *Food Chem*, 212, 671-80.
- Zotti-Sperotto N.C., Melo E.d.C., de Souza M.I.L., Fonseca M.C.M., Gonzaga D.A., de Ávila M.B.R., Demuner A.J., Ventrella M.C. et Lelis A.C.V. (2020).** Effect of drying with ultrasonic pretreatment on the yield and quality of the essential oil of *Varronia curassavica* Jacq. and *Ocimum gratissimum* Linn. *Industrial Crops and Products*, 147, 112211.

Publications et Communications

Publications internationales

1. **BRIKI Samia**, ZITOUNI Bariza, BECHAA Besma, AMIALI Malek (2019). Comparison of convective and infrared heating as means of drying pomegranate arils (*Punica granatum* L.). *Journal Heat and Mass Transfer*. 55, 3189-3199.
2. BECHAA Besma, ZITOUNI Bariza, **BRIKI Samia**, Raghavan Vijaia G. S., AMIALI Malek (2019). Osmotic dehydration facilitates subsequent drying of sliced garlic. *Journal Annals, food science and technology*. 20, 2 : 230-239.

Communications dans des conférences internationales

1. **BRIKI Samia**, ZITOUNI Bariza, BECHAA Besma, AMIALI Malek. Effet d'un prétraitement par déshydratation osmotique sur le séchage des arilles de la grenade (*Punica granatum* L.). Séminaire International sur L'Agroalimentaire « SIA 2018 », 16-17 Octobre 2018. Guelma-Algérie.
2. BECHAA Besma, ZITOUNI Bariza, **BRIKI Samia**, AMIALI Malek. Etude comparative de deux techniques de séchage (infrarouge et convection) des tranches d'ail de type *Allium sativum* L. Séminaire International sur L'Agroalimentaire «SIA 2018 », 16-17 Octobre 2018. Guelma- Algérie.
3. **BRIKI Samia**, ZITOUNI Bariza, BECHAA Besma, AMIALI Malek. Séchage et élaboration de cookies à base d'arilles (*Punica granatum* L.). La 1ère école d'hiver de formation sur « Analyse de Cycle De Vie et L'Eco-Conception »,18-19 Février 2018. Boumerdes-Algérie.
4. BECHAA Besma, ZITOUNI Bariza, **BRIKI Samia**, AMIALI Malek. Optimisation de la déshydratation osmotique des tranches d'*Allium sativum* L. La 1ère école d'hiver de formation sur "Analyse de Cycle De Vie et L'Eco-Conception",18-19 Février 2018. Boumerdes-Algérie.
5. **BRIKI Samia**, ZITOUNI Bariza, BECHAA Besma, AMIALI Malek. Etude comparative de deux techniques de séchage (infrarouge et convection) des arilles de la grenade (*Punica granatum* L.). 1ère Journée Nationale sur la Nutrition et la Sécurité Alimentaire, « JNNSA-2017 », 13 Décembre 2017. Batna-Algérie.
6. BECHAA Besma, ZITOUNI Bariza, **BRIKI Samia**, AMIALI Malek. Etude de l'influence de la température sur la cinétique de la déshydratation osmotique des tranches d'*Allium sativum* L. 1ère Journée Nationale sur la Nutrition et la Sécurité Alimentaire, « JNNSA-2017 », 13 Décembre 2017. Batna-Algérie.
7. **BRIKI Samia**, ZITOUNI Bariza, BECHAA Besma, AMIALI Malek. Effet d'un prétraitement par champ électrique pulsé sur la cinétique de séchage des arilles de la grenade. VIIème Journées Nationale des Sciences de la Nature et de la Vie. 26-27 Avril 2017. Mostaganem-Algérie.
8. BECHAA Besma, ZITOUNI Bariza, **BRIKI Samia**, AMIALI Malek. Impact de champ électrique pulsé sur le séchage convectif des tranches de l'ail. VIIème Journées Nationale des Sciences de la Nature et de la Vie. 26-27 Avril 2017. Mostaganem-Algérie.
9. **BRIKI Samia**, ZITOUNI Bariza, BECHAA Besma. La cinétique de séchage des arilles de la grenade et les propriétés physico-chimiques et fonctionnelles de la poudre de la

grenade. 10ème Congrès Francophone de Génie des Procédés «CFGP 2016 », 26-27 Avril 2016. Safi-Maroc.

10. BECHAA Bisma, ZITOUNI Bariza, **BRIKI Samia**. Etude de l'influence des paramètres de la déshydratation osmotique sur la perte en eau et le gain de solides des tranches de l'ail. 10ème Congrès Francophone de Génie des Procédés «CFGP 2016 », 26-27 Avril 2016. Safi-Maroc.
11. BECHAA Bisma, ZITOUNI Bariza, **BRIKI Samia**. Etude expérimentale de séchage par convection et infrarouge des tranches de l'ail (*Allium Sativum* L.). 10ème Congrès Francophone de Génie des Procédés «CFGP 2016», 26-27 Avril 2016. Safi-Maroc.
12. **BRIKI Samia**, BAICHE Asma, FAHLOUL Djamel. Procédé de fabrication et qualité de la poudre de la grenade et essai d'incorporation en biscuiterie. Séminaire International sur les Sciences Alimentaires (SISA), 14 au 16 Octobre 2014, Constantine, Algérie.

Organisation et participation aux manifestations scientifiques

1. Membre d'organisation dans la 1^{ère} Journée Nationale sur la Nutrition et la Sécurité Alimentaire JNNSA. Tenues le 13 Décembre 2017 à Université de Batna 1.
2. Journée nationale des portes ouvertes sur les laboratoires de recherches universitaires. Tenues le 16 mai 2016 au Faculté de Sciences de la Matière, Université de Batna 1.
3. Participation dans un atelier « comment réussir sa publication ». Tenues 15 au 17 Février 2016 au Campus Numérique Francophone, l'Université des Sciences et de la Technologie, Bab ezzouar, Alger.
4. Quatrième journée nationale d'études et d'information sur le partenariat Université-Environnement Socio-Economique sous le libellé « idées innovantes et créneaux porteurs ». Tenues le 16 et 17 décembre 2013 à l'auditorium, Université de Batna 1.

Co-encadrement: au département de technologie alimentaire, institut des sciences vétérinaires et des sciences agronomiques, université de Batna 1

1. Behdenna Randa, Boukebbal Nadia, Zitouni Bariza et **Briki Samia**, (2020). Etude de l'extraction de colorant à partir de la betterave rouge. Mémoire de master 2.
2. Menasri abdelhak, Boudja oussama, Zitouni Bariza et **Briki Samia**, (2018). Etude de la déshydratation osmotique et son effet sur la cinétique de séchage des fraises. Mémoire de master 2.
3. Nezzar Loubna, Ouazene Fawzia. Zitouni Bariza et **Briki Samia**, (2016). Etude comparative de deux techniques de séchage des arilles de la grenade congelés et non congelées. Mémoire de master 2.

Annexes

Comparison of convective and infrared heating as means of drying pomegranate arils (*Punica granatum L.*)

Samia Briki, Bariza Zitouni, Besma Bechaa & Malek Amiali

Heat and Mass Transfer
Wärme- und Stoffübertragung

ISSN 0947-7411
Volume 55
Number 11

Heat Mass Transfer (2019) 55:3189–3199
DOI 10.1007/s00231-019-02644-8



Your article is protected by copyright and all rights are held exclusively by Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature. This e-offprint is for personal use only and shall not be self-archived in electronic repositories. If you wish to self-archive your article, please use the accepted manuscript version for posting on your own website. You may further deposit the accepted manuscript version in any repository, provided it is only made publicly available 12 months after official publication or later and provided acknowledgement is given to the original source of publication and a link is inserted to the published article on Springer's website. The link must be accompanied by the following text: "The final publication is available at link.springer.com".



Comparison of convective and infrared heating as means of drying pomegranate arils (*Punica granatum* L.)

Samia Briki¹ · Bariza Zitouni¹ · Besma Bechaa¹ · Malek Amiali²

Received: 17 October 2018 / Accepted: 13 May 2019 / Published online: 30 May 2019
© Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2019

Abstract

The purpose of this study is to compare convective and infrared heating as means of drying pomegranate arils. The drying process was conducted at 50, 60 and 70 °C. The minimal times required to reach $9 \pm 0.2\%$ moisture (mass/mass) starting from $78 \pm 0.2\%$ were 510 and 94 min respectively for convective and infrared drying. Calculation of aril effective diffusivity (D_{eff}) was based on Fick's second law of diffusion. At all temperatures, D_{eff} values ranged from $2.56 \cdot 10^{-10}$ to $4.75 \cdot 10^{-10}$ m²/s, and from $0.87 \cdot 10^{-9}$ to $2.64 \cdot 10^{-9}$ m²/s respectively for convective and infrared drying. Effective moisture diffusivity (D_{eff}) values were found to increase as temperature to increase. Pomegranate is one of the major sources of polyphenolic phytochemicals. Polyphenol stability might be affected by heat treatments that are required during drying. Based on the maximal total polyphenol content (205 ± 0.89 mg/100 g) of the dried product, the optimal temperature for infrared drying was 50 °C. This product also had an intense garnet-red color and a satisfactory rehydration capacity. Various models of drying kinetics were tested for conformity with the results obtained in this study. The model that best fit the drying data was the modified logistic model of Midilli et al., than other models.

1 Introduction

Adaptable to harsh environmental conditions and growing well in arid and semiarid regions, pomegranate is a very widespread indigenous plant in Algeria. Pomegranate fruit is consumed fresh or can be processed into juice, syrup, jam or ingredients for other food preparations. It is one of the richest sources of antioxidants, in particular polyphenols, tannins (punicalagin and punicalin) and anthocyanins [4, 23]. A diet rich in antioxidants is believed to lessen the risk of developing chronic illnesses such as cardiovascular disease, type 2 diabetes, cancer, neurodegenerative diseases and inflammatory diseases [14, 23].

The edible part of the pomegranate fruit consists primarily of arils (40%) and seeds (10%). Arils contain 85% water, 10% total sugars (mainly fructose and glucose), 1.5% pectin, organic acids (mainly ascorbic, citric and malic) and various

bioactive compounds [51]. However, the shelf-life of pomegranates at ambient temperatures is no more than 12–14 days [19]. In order to increase its shelf-life, the fruit is often dried.

Drying is a traditional process used to preserve and extend the shelf-life of many food products. Water removal alone is often sufficient to prevent food spoilage and microbial proliferation, since these phenomena are halted below a certain water activity [37]. Because of its cost-effectiveness, convective drying (CD) remains the most popular method of reducing the moisture content of fruits and vegetables. However, it has the drawback of reducing product quality (degrading macromolecules, vitamins and color) especially when the drying time is long [19, 37]. Alternatives such as drying by infrared (IR) are being examined. Infrared drying has been found to be effective means of dehydrating food [50]. Since the energy of IR radiation is transferred directly to the product without heating the surrounding air, it appears to hold the promise of greater efficiency compared to conventional drying modes such as convective heat transfer [18, 30]. IR drying is especially effective for products with a high water content. Studies have shown that IR drying is faster and yields better texture, flavor and color compared to conventional methods of drying [40–43, 50].

Mathematical modeling is suitable for describing the kinetics of drying processes. Models can be categorized as theoretical, semi-theoretical or empirical [54]. Semi-theoretical models are

✉ Malek Amiali
m.amiali@ensa.dz

¹ Food Sciences Laboratory, Department of Food Technology, Veterinary Sciences and Agronomic Sciences Institute, Université BATNA 1 Hadj Lakhdar, Batna, Algeria

² Food Technology and Human Nutrition Research Laboratory, Ecole Nationale Supérieure Agronomique (ES1603), El Harrach, Algeria

popular and appear to be a good choice for modeling fruit drying kinetics. They are derived from general solutions of Fick's second law of diffusion. Some commonly used models are those of Page, Henderson and Pabis, Lewis, Midilli et al. [36] as well as the two-term and diffusion approximation models. Empirical models such as those of Wang and Singh and of Thompson are derived from a direct relationship between average moisture content and drying time [9, 16, 39].

There is considerable recent research on mathematical modeling of the drying characteristics of various vegetables and fruits, such as cocoyam slices [2], sweet potato [40, 41], garlic slices [54], zingiberofficinale slices [45] and uvaia [46]. However, mathematical modeling of the kinetics of IR drying of pomegranate arils has rarely been investigated [26]. The main objective of this study is to determine the influence of two different drying methods (convective and infrared) on the biochemical composition, color and rehydration properties of dry arils and to model the drying kinetics.

2 Materials and methods

2.1 Product

Fresh pomegranate fruits (*P. granatum L.* Sweet-acid) were picked from mature trees in AinTouta City (Batna, Algeria) in the autumn of 2017. They were at full maturity and had following characteristics: weight 386.53 ± 3.55 g, pH 3.86 ± 0.04 and 16 ± 0.13 °Brix. They were kept in a refrigerator at 4 ± 1 °C until drying, at which point they were washed and cut and the arils were separated manually.

2.2 Drying methods

The aril initial moisture content (M_0) was $78 \pm 0.2\%$ (3.54 ± 0.2 kg per kg of dry matter). This was determined by drying in a vacuum oven at 70 °C for 24 h according to the method of the Association of Official Analytical Chemists [5]. Samples weighing approximately 30 g were subjected to two different drying protocols:

2.2.1 Convective drying

Convective drying was carried out in a MEMMERT drying cabinet (UF750, Germany) comprising a centrifugal fan to induce airflow, an electric heating element, an air filter, a proportional controller for air temperature and a fan speed control. Samples were dried at 50, 60 and 70 °C and constant air speed (2.0 ± 0.1 m/s). Weight loss was measured at 10 min intervals. Drying was stopped when the moisture content became constant (at 0.09 ± 0.002 kg per kg of dry matter, hereinafter $9 \pm 0.2\%$). The dried samples were cooled inside the

cabinet then packed in polyethylene bags to avoid rehydration by humidity in the ambient air.

2.2.2 Infrared drying

The IR desiccator (IR 35 DENVER INSTRUMENTS, Denver, Colorado, USA) used in this study is shown in Fig. 1. It contains a moisture analyzer consisting of a heating unit, weighing system and control unit. The device was warmed up for about 10 min in order to maximize treatment consistency. Samples were then dried at 50, 60 and 70 °C. Weight loss was measured at 10 min intervals. Drying was stopped when the moisture content became stable (at $9 \pm 0.2\%$). The dried pomegranate arils were cooled inside the desiccator then packed in polyethylene bags.

2.3 Mathematical modeling of drying

2.3.1 Drying kinetics

The pomegranate aril moisture ratio (MR) was calculated using Eq. (1):

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

where M_t and M_0 are moisture contents (in kg of water per kg of dry matter) at times “t” and “0” and M_e is the equilibrium moisture content (same dimensions).

Different models were tested as predictors of pomegranate drying kinetics (see Table 1). Non-linear regression analysis was performed using Sigma Plot/SPW11 software (version 11, 2008, USA) to fit the experimental data to the selected model equations. Statistical analysis was used to evaluate the adjustment of the experimental data to the models using R^2 (coefficient of determination), reduced chi-square (χ^2) and root mean square error (RMSE). These parameters were calculated using the equations below:

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{ei} - MR_{pi})^2}{N - Z}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{ei} - MR_{pi})^2}$$

where MR_{ei} is the experimental moisture ratio, MR_{pi} is the predicted moisture ratio, N is the number of observations and Z is the number of constants in the model.

The pomegranate aril drying rate (DR) was calculated using Eq. 2:

$$DR = \frac{M_t - M_{t+\Delta t}}{\Delta t} \quad (2)$$

Fig. 1 Infrared drying apparatus: (IR 35 DENVER INSTRUMENT)

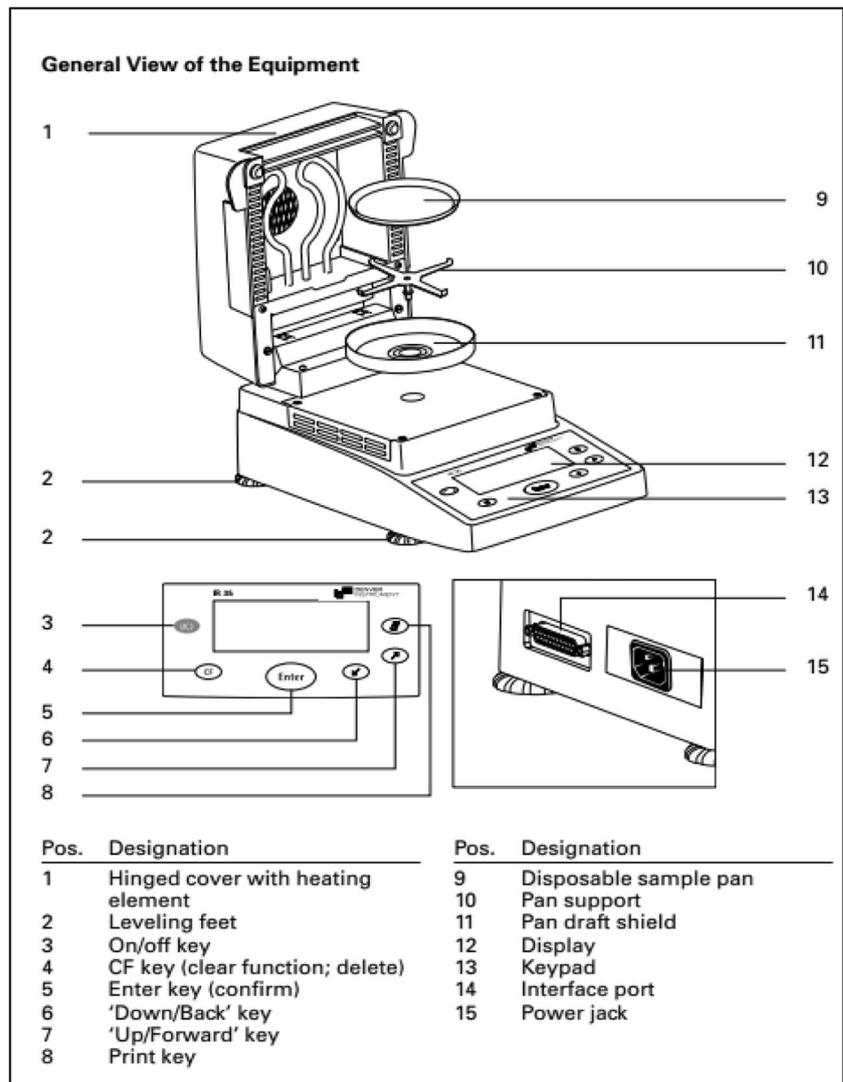


Table 1 Mathematical models used to describe the thin-layer drying curve moisture ratio

No.	Model name	Equation	Reference
1	Lewis	$MR = \exp(-k \cdot t)$	Bruce [12]
2	Page	$MR = \exp(-k \cdot t^n)$	Page [44]
3	Modified Page	$MR = \exp(-k \cdot t)^n$	Overhults et al. [42]
4	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-k \cdot t)$	Hashim et al. [32]
5	Logarithmic	$MR = a \exp(-k \cdot t) + c$	Toğrul and Pehlivan [49]
6	Two-term	$MR = a \exp(-k_0 \cdot t) + b \exp(k_1 \cdot t)$	Sacilik [47]
7	Two-term exponential	$MR = a \exp(-k \cdot t) + (1-a) \exp(-k_a \cdot t)$	Dash et al. [20]
8	Wangand Singh	$MR = 1 + a + b \cdot t^2$	Wang and Singh [52]
9	Modified Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-k \cdot t) + b \exp(-g \cdot t) + c \exp(-h \cdot t)$	Zenoozian et al. [55]
10	Midilli et al.	$MR = a \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$	Midilli et al. [36]
11	Demir et al.	$MR = a \exp(-k \cdot t^n) + b$	Demir et al. [22]

Where, $M_{t+\Delta t}$ is moisture content at time $t + \Delta t$ and Δt is the difference between two successive drying times in minutes.

2.3.2 Determination of effective moisture diffusivity (D_{eff})

The effective diffusivity was calculated based on Fick's second law of diffusion (Eq. 3) according to the Doymaz [24, 25] protocol:

$$\frac{\delta M}{\delta t} = D_{eff} \nabla^2 M \quad (3)$$

The analytical solution of Fick's second law for a spherical shape assuming moisture migration by diffusion and constant temperature during drying is given as Eq. 4:

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{L^2} t\right) \quad (4)$$

Where D_{eff} is the effective moisture diffusivity (m^2/s), t is the treatment time (s) and L is the half-thickness of the samples (m). For longer drying periods, Eq. 5 was used:

$$\ln MR = \ln \frac{6}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff}}{L^2} t \quad (5)$$

Effective diffusivity is obtained by plotting the experimental drying data in terms of $\ln MR$ as a function of time, where K is the slope of the curve (Eq. 6):

$$K = \frac{\pi^2 D_{eff}}{R^2} \quad (6)$$

2.3.3 Computation of activation energy

The dependence of diffusivity on the effective moisture temperature is described by the Arrhenius equation (Eq. 7)

$$D_{eff} = D_0 e^{\frac{E_a}{R(T+273.15)}} \quad (7)$$

Where D_0 is the Arrhenius pre-exponential factor (m^2/s), E_a (kJ/mol) is the activation energy, R is the universal gas constant (kJ/mol·K), and T ($^{\circ}C$) is the treatment temperature.

2.4 Physicochemical composition of dried arils

2.4.1 Total polyphenols

Each sample was reduced to powder with a mortar and pestle and 1.0 g was shaken carefully with 2.5 ml of Folin-Ciocalteu reagent diluted 10-fold. After 1 min, 2.0 ml of 7.5% sodium carbonate (Na_2CO_3) solution was added. The mixture was allowed to settle for 30 min at room temperature ($25^{\circ}C$). The absorption at 760 nm of the clear liquid above the layer

of sediment was measured using a spectrophotometer (SHIMADZU UV-1800). The results were expressed in milligrams of gallic acid per gram of dry weight.

2.4.2 Color analysis

Color changes during drying were measured using a KONICA MINOLTA (CR-10, Japan) colorimeter. The color was determined in terms of the parameters L^* , a^* and b^* . The L^* value is a measurement of lightness, ranging from 0 (black) to +100 (white), the a^* value ranges from -100 (greenness) to +100 (redness) and the b^* value ranges from -100 (blueness) to +100 (yellowness).

2.4.3 Rehydration capacity

Rehydration (water absorption) capacity (RC) was determined according to the method of Horuz and Maskan [33] and calculated using Eq. 8:

$$RC\% = \left(\frac{W_t - W_d}{W_d} \right) \times 100 \quad (8)$$

Where W_t and W_d are respectively the weights of the arils at time "t" and at initial time.

2.5 Statistical analysis

Analysis of variance (ANOVA) was performed using the General Linear Models procedures (GLM) of SigmaPlot\SPW11 software (version 11, 2008, USA). Experiments were performed in triplicate and the means of the three data sets are presented. Means were separated by least significant difference according to Duncan's multiple ranges.

3 Results and discussion

3.1 Drying behavior of the pomegranate arils

3.1.1 Moisture ratio and drying rate

Profiles of moisture content over time for infrared and convective drying of pomegranate arils are shown in Figs. 2 and 3. The moisture content is inversely proportional to the drying temperature and decreases exponentially over time. The decrease in moisture ratio (MR) is more rapid than the increase in thermal energy, which increases water molecule activity and hence moisture diffusivity [18, 24, 25]. The curves show that water loss is nearly linear for at least the first half of the convective drying process. In the case of IR drying, the additional data suggest a brief delay in water loss at the very

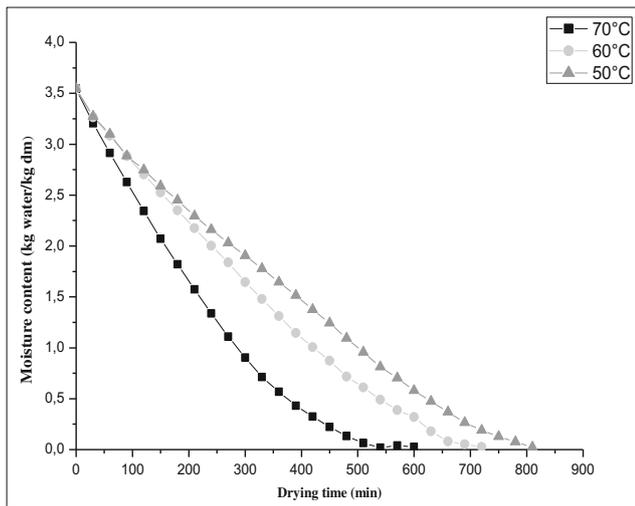


Fig. 2 Drying of pomegranate arils by convective heating at different temperatures

beginning, which is expected because the drying temperature has not yet reached the wet equilibrium temperature. Once this equilibrium is reached, water loss progresses linearly as liquid is transported to the product surface by capillary forces, where it evaporates [31].

With convective heating, the times required to dry pomegranate arils from an initial moisture content of $78 \pm 0.2\%$ to a final content of $9 \pm 1\%$ were 780, 660 and 510 min respectively at 50, 60 and 70 °C. With infrared heating, these times were respectively 260, 132 and 94 min, that is, considerably shorter. Not only was drying by infrared heating nearly three times faster at 70 °C than at 50 °C, it was three times faster than convective drying when compared at 50 °C, five times faster at 60 °C and more than five times faster at 70 °C. Several

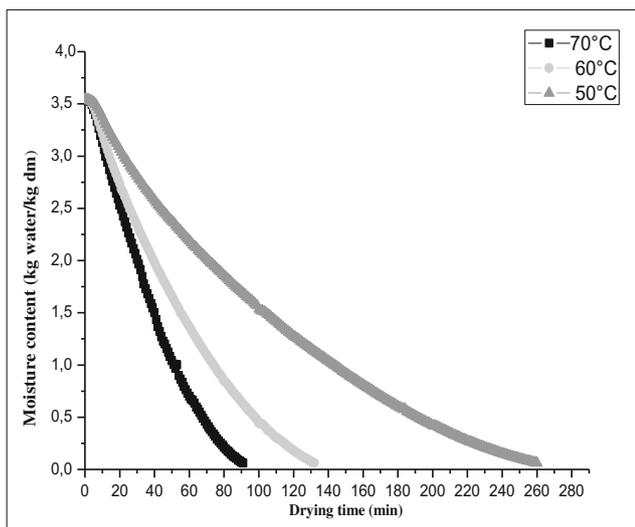


Fig. 3 Drying of pomegranate arils by infrared heating at different temperatures

authors have reported similar increases in the rate of drying of plant products as the temperature increases, regardless of the method used [6, 24, 25, 46, 48]. It is possible that by delivering more energy to the product being dried, infrared drying accelerates both heat transfer and mass transfer in comparison with convective drying. In other words, increasing the intensity of the infrared source raised the temperature of the whole sample more rapidly, thus increasing both the water vapor pressure at the surface and moisture diffusion inside the material. An increased exergy investment for moisture evaporation thus appears to increase the exergy efficiency of the drying process. Infrared radiation might also interact with chemical constituents other than water, further increasing product temperature and hence the mobility of internal moisture [3, 18]. It is therefore to be expected that IR drying technology would provide a higher drying efficiency when compared to convective drying.

The drying rate of pomegranate arils as a function of moisture content is shown in Figs. 4 and 5.

For both convective and infrared heating, the drying rate decreases with decreasing moisture content, starting fast during the initial period and becoming very slow towards the end of the process. The initial and final drying rates averaged for 50, 60 and 70 °C were respectively 0.009 and 0.011 for convection and 0.033 and 0.071 for infrared drying (in kg of water/kg dry matter/min). At all temperatures, drying is faster during the initial period regardless of the technology. It is known that as the moisture content approaches equilibrium, drying rates slow down [45]. Furthermore, the rate of drying of pomegranate arils never appears to be very constant. This has been observed previously with pomegranate arils and other plant products dried by convective methods [17, 45]. Finally, it is noted that at 70 °C, the IR drying rate is seven times faster than the convective drying rate.

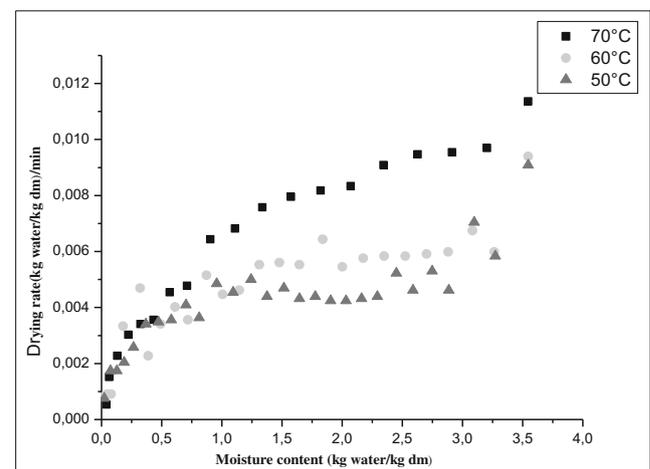


Fig. 4 Rate of drying of pomegranate arils by convective heating at different temperatures

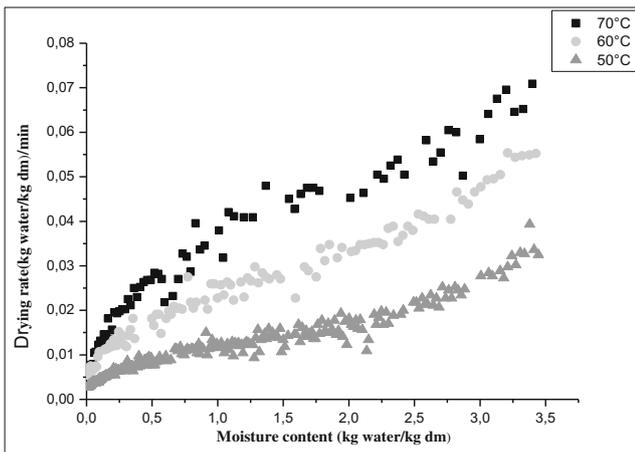


Fig. 5 Rate of drying of pomegranate arils by infrared heating at different temperatures

3.1.2 Evaluation of drying models

Pomegranate aril drying data were converted into moisture content (MR) and adapted to six semi-empirical models. The model parameter values were determined using nonlinear regression. Table 1 lists all of the models by name, equation and reference. Tables 2 and 3 show respectively for infrared drying and convective drying the goodness of fit of each of the six preferred models in terms of coefficient of determination (R^2), Chi-square (χ^2) and root mean square error (RMSE).

For both types of drying, R^2 values were at least 0.97 while χ^2 and RMSE values were below 2.7×10^{-3} and 0.0710 respectively for infrared drying and below 4.2×10^{-3} and 0.06 respectively for convective drying.

The model that best fit the drying data was the modified logistic model of Midilli et al., for which the R^2 , χ^2 and RMSE values ranged respectively from 0.998 to 0.999, 4.6×10^{-5} to 2.6×10^{-4} and 0.01 to 0.005 for infrared drying and 0.977 to 0.999, 1×10^{-4} to 4×10^{-3} and 0.04 to 0.06 for convective drying. In addition to predicting satisfactorily the drying characteristics of pomegranate arils, this model has performed similarly with other agricultural crops and byproducts, such as name at least two [7].

3.1.3 Effective moisture diffusivity

The effective moisture diffusivity (D_{eff}) values calculated by using Eq. 3 varied from 2.56×10^{-10} to 4.75×10^{-10} m^2/s for convection-dried samples. For IR, the range was 0.87×10^{-9} to 2.64×10^{-9} m^2/s . The coefficients of determination for both methods were greater than 0.99 (see Figs. 6 and 7). The D_{eff} values obtained in this study lie within in the general range of 10^{-12} to 10^{-8} m^2/s for drying of food materials [26, 56].

Temperature and drying method had a significant effect on D_{eff} value. In addition to increasing water temperature, infrared radiation increases molecular energy in terms of the vibrational, rotational and electronic states of chemically bonded atoms. These heightened energy states are imparted to water molecules, further increasing sample temperature and raising vapor pressure and consequently increasing the diffusion of moisture towards the sample surface [40, 41]. It has been shown that D_{eff} increases as temperature rises [16, 18, 53]. This is likely due to the effect of temperature on mass transfer

Table 2 Goodness of fit of six models for infrared drying at three temperatures

Model	Coefficient	50°C	60°C	70°C
MR = exp(-k·t)	R^2	0.9740	0.9840	0.9898
	χ^2	0.005103825	0.002837114	0.00164662
	RMSE	0.071047443	0.053062426	0.040500455
MR = a exp(-k·t)	R^2	0.9866	0.9912	0.9931
	χ^2	0.002674054	0.001575388	0.001124618
	RMSE	0.051139843	0.039389325	0.033406092
MR=a exp(-k·t ⁿ)+b·t	R^2	0.9987	0.9998	0.9998
	χ^2	0.000263226	4.6106E-05	3.39937E-05
	RMSE	0.015954572	0.006712532	0.00579668
MR = a exp(-k ₀ ·t) + b exp(k ₁ ·t)	R^2	0.9866	0.9912	0.9998
	χ^2	0.002735494	0.001599976	3.41265E-05
	RMSE	0.051139537	0.039388981	0.00579668
MR = a exp(-k·t) + b exp(-g·t) + c exp(-h·t)	R^2	0.988	0.9918	0.9998
	χ^2	0.002513891	0.001523804	3.43952E-05
	RMSE	0.04845761	0.038138435	0.00579668
MR = 1 + a·t + b·t ²	R^2	0.9994	0.9998	0.9993
	χ^2	0.000132967	4.19642E-05	0.000121847
	RMSE	0.011339457	0.006403942	0.010974559

Table 3 Goodness of fit of six models for convective drying at three different temperatures

Model	Coefficient	50°C	60°C	70°C
MR = exp(-k·t)	R ²	0.9771	0.9775	0.9835
	χ ²	0.00402185	0.00424998	0.00329894
	RMSE	0.06223253	0.06381924	0.05581815
MR = a exp(-k·t)	R ²	0.98	0.9818	0.9873
	χ ²	0.00364829	0.00357926	0.00270846
	RMSE	0.05812094	0.05727992	0.04906652
MR = a exp(-k·t ⁿ)+b·t	R ²	0.9993	0.9995	0.9993
	χ ²	0.00017725	0.00014859	0.00017064
	RMSE	0.01255214	0.01140243	0.01192466
MR = a exp(-k ₀ ·t) + b exp(k ₁ ·t)	R ²	0.9811	0.9838	0.9901
	χ ²	0.0037722	0.00350582	0.00240237
	RMSE	0.05668649	0.05405106	0.04322625
MR = a exp(-k·t) + b exp(-g·t) + c exp(-h·t)	R ²	0.9811	0.9838	0.9901
	χ ²	0.00394367	0.00389516	0.00280276
	RMSE	0.05668649	0.05404972	0.04322625
MR = 1 + a·t + b·t ²	R ²	0.9993	0.9997	0.9998
	χ ²	0.00031929	0.00049019	0.00023759
	RMSE	0.01684665	0.02071021	0.01407101

and thus faster diffusion of moisture within the sample [29]. The results obtained in the present study corroborate those reported previously for the drying of olive pomace, blueberries and pomegranate seeds [26, 56].

3.1.4 Activation energy

The activation energy (E_a) is determined from the Arrhenius equation (Eq. 7). The values thus calculated for convective drying and infrared drying of pomegranate arils are respectively 45.92 kJ/mol and 25.63 kJ/mol, which are within the range of 12.7 to 110 kJ/mol reported for various foods [24].

The value obtained for convective drying is lower than what has been reported previously (60.34 kJ/mol), due perhaps to the apparatus used to dry the product, a pilot-scale apparatus in the latter case [24]. However, in a similar study using a laboratory apparatus at 55, 65 and 75 °C, the same author obtained an E_a of 49.7 kJ/mol [25].

Studies on IR drying of pomegranate arils are very rare. Working with carrot slices, [48] reported an activation energy quite similar to what we obtained (22.43 kJ/mol vs 25.63 kJ/mol).

In the case of pomegranate arils, IR-drying has a lower activation energy than convection-drying. This could be due

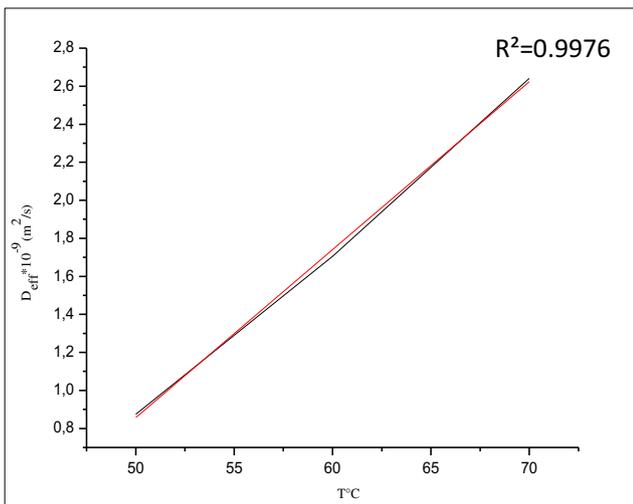


Fig. 6 Effective diffusivity during convective drying as function of air temperature

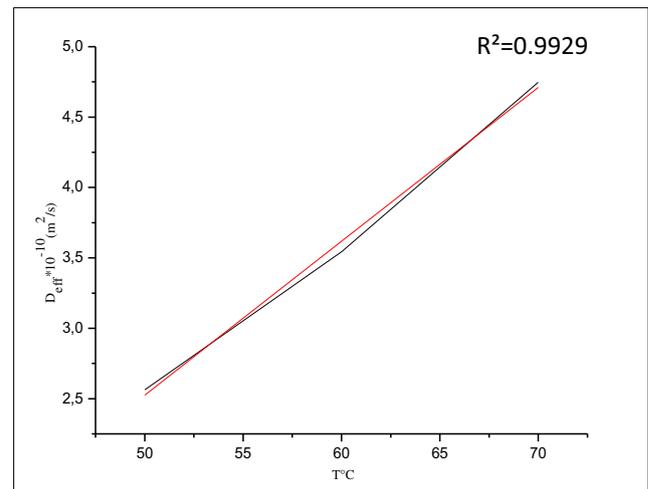


Fig. 7 Effective diffusivity during infrared drying as a function of air temperature

to the flow of air around the drying material in convection drying. In addition, IR is applied directly to the sample surface without heating surrounding air or creating air currents. Although it remains unclear how deeply IR penetrates the material, heat is certainly transferred to the inside by conduction. The sample thus absorbs electromagnetic energy directly. The absorbed energy causes molecular vibration, analogous to the oscillation of water molecules believed to occur in microwave heating. Moisture inside the material is thus heated rapidly and vaporized. Since no energy is wasted on heating air that does not come into contact with the product, infrared drying appears to be more energy-efficient than convective drying. This makes IR an attractive source of thermal energy both for shortening drying time and for decreasing energy consumption [11, 35, 40, 41].

3.2 Physicochemical composition of dried pomegranate arils

3.2.1 Total polyphenols

Preservation of nutritional value is a major consideration when dehydrating fruits. Both the antioxidant activity and important sensory characteristics of the final product depend on preserving polyphenolic compounds [38]. Figure 8 shows the total polyphenol content of dried pomegranate arils as a function of treatment temperature for both drying methods.

The physicochemical properties and chemical structure of phenolic compounds may be affected by drying method as well as treatment temperature and time [28]. At 50 and 60 °C, the polyphenol content remained higher in the arils dried by infrared compared to those dried by convection

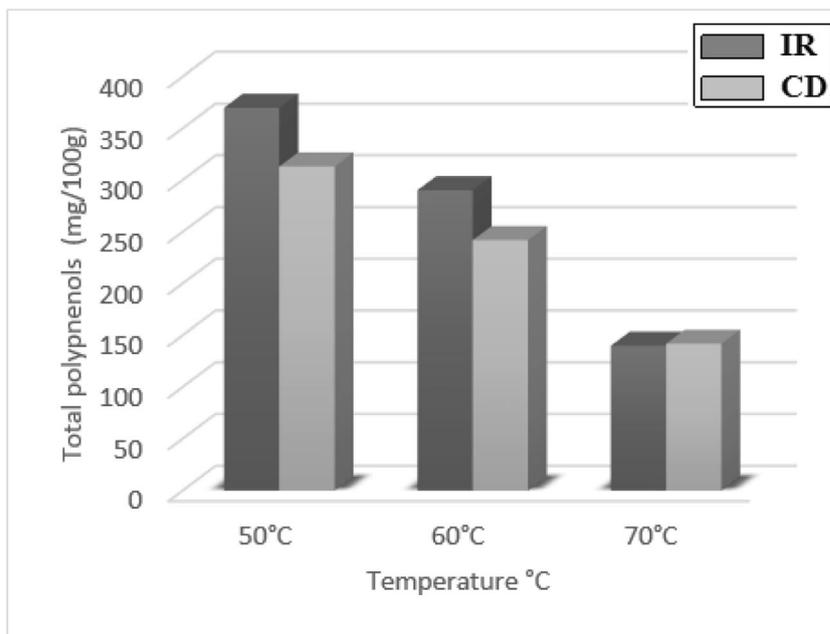
(Fig. 8). Adak et al. [1] have shown that IR heating is an effective means of improving the physicochemical stability of dried plant products. At 70 °C, the polyphenol content dropped by almost the same amount regardless of the heat source, suggesting that drying temperature alone has a major impact on polyphenols [37]. Both polymerization and chemical oxidations appear to be largely responsible for these losses [28]. Enzymatic and other non-enzymatic reactions also may be involved [8]. In the case of pomegranate arils, better final product quality was obtained at a drying temperature of 60 °C, in this study and in a previous study [13].

3.2.2 Color analysis of dried arils

Color retention is a measurement of food quality deterioration due to any kind of processing. The L^* , a^* and b^* parameters are widely used to quantify color changes during thermal and non-thermal treatments of fruits and vegetables [6, 33]. Figure 9 shows their variation in pomegranate arils during drying by convective means and by IR.

Processing temperature and time have considerable influence on color, the L^* , a^* and b^* values all increasing with drying time and reaching maxima of 29.9, 20.0 and 15.63 respectively for IR drying at 50 °C. The increase in color may be due to both Maillard and enzymatic reactions [6]. For both drying methods, the a^* value was generally higher at 50 °C than at 60 and 70 °C. This was unclear for the b^* value while the L^* value decreased appreciably only at 70 °C. This may be due to enzymatic oxidation being active at 50 °C and less so at 60 and 70 °C due to thermal denaturing of the oxidases [21]. Polyphenol oxidase and peroxidase are the enzymes most involved in enzymatic browning processes. In the

Fig. 8 Total polyphenol content of pomegranate arils dried by infrared heating (IR) and by convective heating (CD)



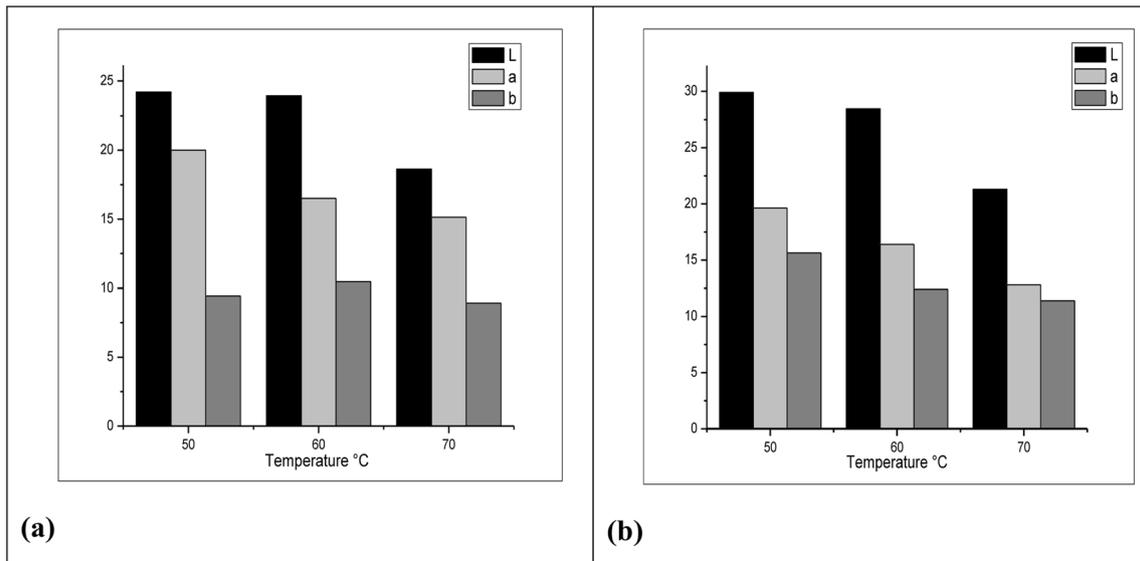


Fig. 9 Variation of color parameters (L^* , a^* and b^*) of pomegranate arils dried by **a** convective heating, **b** infrared heating

presence of oxygen, polyphenol oxidase catalyses hydroxylation of phenols (monophenolase) and oxidation of *o*-diphenols to *o*-quinones, which subsequently polymerise to yield brown pigments [15]. In fruits and vegetables, this is a natural defence mechanism and is generally undesirable to consumers, a notable exception being black tea.

The redness (a^*) of dried arils ranged from just under 20 for both infrared and convective drying to 12.8 for arils IR-dried at 70 °C. According to [51], the color of dried fruit is influenced by several factors: fruit variety, maturity, the drying process and the drying time.

Heat-sensitive pigments such as anthocyanins are strongly affected during heat treatment. Changes in a^* value (from natural red to brownish color) are attributed to the destruction

of anthocyanins and the appearance of both non-enzymatic and enzymatic reaction products [13, 33].

3.2.3 Rehydration capacity

Since dehydrated food products are usually rehydrated before consumption, rehydration characteristics are used as a quality index [27]. This index can also be considered as a measure of the physical and chemical changes that have occurred in the food during drying ([33, 34]; 6). The rehydration capacities of dried pomegranate arils obtained by convective and infrared drying were calculated from Eq. 8 and are presented in Fig. 10. The curves show that the water absorption rate was higher initially and then decreased as rehydration continued. The initial rate may be attributed to uptake by capillaries and

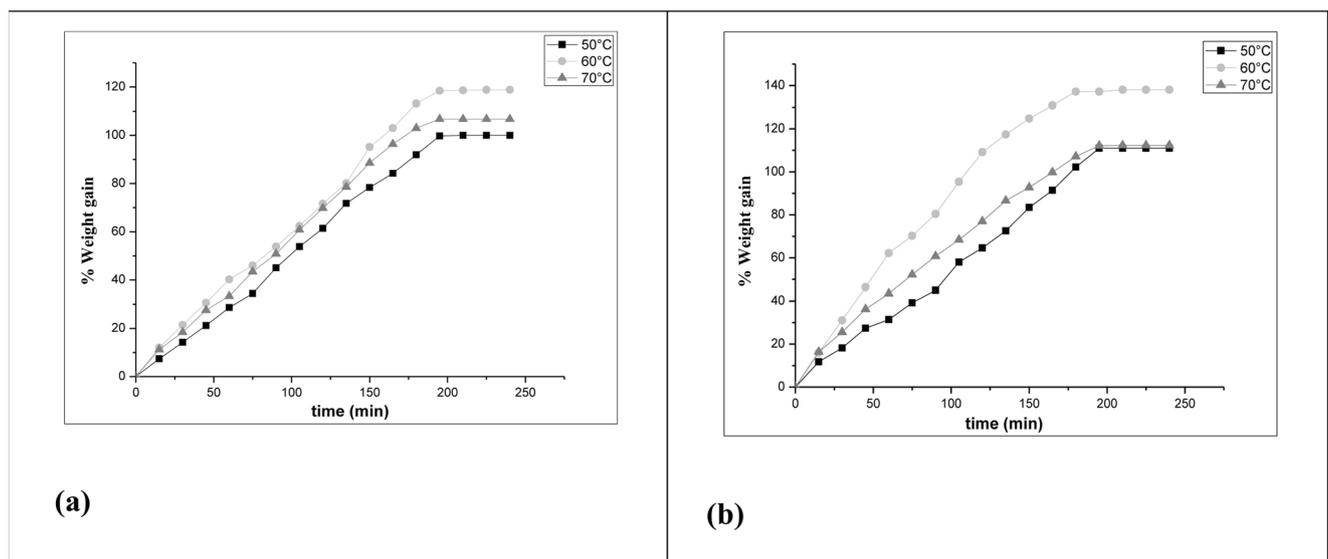


Fig. 10 Absorption of water by pomegranate arils dried at different temperatures by: **a** convective drying and **b** infrared drying

cavities near the surface of the dried product [10, 34]. Figure 10 also shows that for a given drying temperature, the water retention capacity of IR-dried arils was greater than that of convection-dried arils. For both drying methods, the water retention capacity was noticeably greater at 60 °C than at 50 °C or 70 °C. This suggests that structural changes causing a loss of hydrophilic character (or an increase in hydrophobic character) were more extensive at these latter two temperatures, possibly for different reasons, for example increased formation of polyphenol-based precipitates at 50 °C and increase Maillard browning and thermal denaturing at 70 °C. Horuz and Maskan [33] found similar results for the drying of pomegranate arils by hot air and by microwave heating.

4 Conclusion

This study of the effect of drying by convection and by infrared heating at three different temperatures shows that the drying time of pomegranate aril slices decreases and the effective moisture diffusivity increases as processing temperature increases. Even though the time required is shortened at higher temperature, drying by infrared at 50 °C appears to be optimal if the criteria are total polyphenol content and garnet color intensity. If the criterion is water absorption upon rehydration, infrared heating at 60 °C appears to be optimal. Dried pomagranate arils absorb up to 100–140% of their weight in water.

References

- Adak N, Heybeli N, Ertekin C (2017) Infrared drying of strawberry. *Food Chem* 219:109–116
- Afolabi TJ, Tunde-Akintunde TY, Adeyanju JA (2015) Mathematical modeling of drying kinetics of untreated and pretreated cocoyam slices. *J Food Sci Technol* 52:2731–2740
- Aghbashlo M (2016) Exergetic simulation of a combined infrared-convective drying process. *Heat Mass Transf* 52:829–844
- Alcaraz-Mármol F, Nuncio-Jáuregui N, García-Sánchez F, Martínez-Nicolás JJ, Hernández F (2017) Characterization of twenty pomegranate (*Punica granatum* L.) cultivars grown in Spain: aptitudes for fresh consumption and processing. *Sci Hort* 219:152–160
- AOAC (1990) Official Methods of Analysis, 15th edn. (Association of Official Analytical Chemists, Washington DC)
- Aral S, Beşe AV (2016) Convective drying of hawthorn fruit (*Crataegus* spp.): effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity. *Food Chem* 210:577–584
- Babu AK, Kumaresan G, Antony Aroul Raj V, Velraj R (2018) Review of leaf drying: Mechanism and influencing parameters, drying methods, nutrient preservation, and mathematical models. *Renew Sust Energ Rev* 90:536–556
- Behir B, Besbes S, Karoui R, Attia H, Paquot M, Blecker C (2012) Effect of air-drying conditions on physico-chemical properties of osmotically pre-treated pomegranate seeds. *Food Bioprocess Technol* 5:1840–1852
- Behera G, Sutar PP (2018) A comprehensive review of mathematical modeling of paddy parboiling and drying: effects of modern techniques on process kinetics and rice quality. *Trends Food Sci Technol* 75:206–230
- Beigi M (2017) Thin layer drying of wormwood (*Artemisia absinthium* L.) leaves: dehydration characteristics, rehydration capacity and energy consumption. *Heat Mass Transf* 53:2711–2718
- Brandão RJ, Borel LDMS, Marques LG, Prado MM (2016) Heat and mass transfer, energy and product quality aspects in drying processes using infrared radiation. In: Delgado JMPQ, de Lima AGB (eds) *Drying and energy technologies*. Springer International Publishing, Cham, pp 111–130
- Bruce DM (1985) Exposed layer barley drying, three models fitted to new data up to 150 °C. *J Agric Engr Res* 32:337–47
- Calín-Sánchez Á, Figiel A, Hernández F, Melgarejo P, Lech K, Carbonell-Barrachina AA (2013) Chemical composition, antioxidant capacity, and sensory quality of pomegranate (*Punica granatum* L.) arils and rind as affected by drying method. *Food Bioprocess Technol* 6:1644–1654
- Cano-Lamadrid M, Lech K, Michalska A, Wasilewska M, Figiel A, Wojdylo A, Carbonell-Barrachina AA (2017) Influence of osmotic dehydration pre-treatment and combined drying method on physico-chemical and sensory properties of pomegranate arils, cultivar Mollar de Elche. *Food Chem* 232:306–315
- Cao X, Cai C, Wang Y, Zheng X (2018) The inactivation kinetics of polyphenol oxidase and peroxidase in bayberry juice during thermal and ultrasound treatments. *Innovative Food Sci Emerg Technol* 45:169–178
- Castro AM, Mayorga EY, Moreno FL (2018) Mathematical modeling of convective drying of fruits: a review. *J Food Eng* 223:152–167
- Chen Q, Bi J, Wu X, Yi J, Zhou L, Zhou Y (2015) Drying kinetics and quality attributes of jujube (*Zizyphus jujuba* miller) slices dried by hot-air and short- and medium-wave infrared radiation. *LWT Food Sci Technol* 64:759–766
- Chen NN, Chen MQ, Fu BA, Song JJ (2017) Far-infrared irradiation drying behavior of typical biomass briquettes. *Energy* 121:726–738
- Dak M, Sagar VR, Jha SK (2014) Shelf-life and kinetics of quality change of dried pomegranate arils in flexible packaging. *Food Packaging and Shelf Life* 2:1–6
- Dash K, Gope S, Sethi A, Doloi M (2013) Study on thin layer drying characteristics star fruit slices. *International Journal Agriculture and Food Science Technology* 4:679–686
- de Oliveira Carvalho J, Orlanda JFF (2017) Heat stability and effect of pH on enzyme activity of polyphenol oxidase in Buriti (*Mauritia flexuosa* Linnaeus f.) fruit extract. *Food Chem* 233:159–163
- Demir VĀ, Gunhan T, Yagcioglu AK (2007) Mathematical modeling of convection drying of green table olives. *Biosyst Engr* 98:47–53
- Diamanti AC, Igoumenidis PE, Mourtzinis I, Yannakopoulou K, Karathanos VT (2017) Green extraction of polyphenols from whole pomegranate fruit using cyclodextrins. *Food Chem* 214:61–66
- Doymaz İ (2011a) Drying of pomegranate arils and selection of a suitable drying model. *Food Biophysics* 6:461–467
- Doymaz İ (2011b) Prediction of drying characteristics of pomegranate arils. *Food Anal Methods* 5:841–848
- Doymaz İ (2012) Drying of pomegranate seeds using infrared radiation. *Food Sci Biotechnol* 21:1269–1275
- Ergün K, Çalıřkan G, Dirim SN (2016) Determination of the drying and rehydration kinetics of freeze dried kiwi (*Actinidia deliciosa*) slices. *Heat Mass Transf* 52:2697–2705

28. Galaz P, Valdenegro M, Ramírez C, Nuñez H, Almonacid S, Simpson R (2017) Effect of drum drying temperature on drying kinetic and polyphenol contents in pomegranate peel. *J Food Eng* 208:19–27
29. Ghasemi A, Chayjan RA (2018) Optimization of pelleting and infrared-convection drying processes of food and agricultural waste using response surface methodology (RSM). *Waste and Biomass Valorization* 10(6):1711–1729
30. Glouannec P, Lecharpentier D, Noel H (2002) Experimental survey on the combination of radiating infrared and microwave sources for the drying of porous material. *Appl Therm Eng* 22:1689–1703
31. Hammouda I, Mihoubi D (2014) Comparative numerical study of kaolin clay with three drying methods: convective, convective-microwave and convective infrared modes. *Energy Convers Manag* 87:832–839
32. Hashim N, Daniel O, Rahaman E (2014) A preliminary study: kinetic model of drying process of pumpkins (*Cucurbita Moschata*) in a convective hot air dryer. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 2:345–352
33. Horuz E, Maskan M (2015) Hot air and microwave drying of pomegranate (*Punica granatum* L.) arils. *J Food Sci Technol* 52:285–293
34. Horuz E, Bozkurt H, Karataş H, Maskan M (2017) Effects of hybrid (microwave-convective) and convective drying on drying kinetics, total phenolics, antioxidant capacity, vitamin C, color and rehydration capacity of sour cherries. *Food Chem* 230:295–305
35. Lechtańska JM, Szadzińska J, Kowalski SJ (2015) Microwave- and infrared-assisted convective drying of green pepper: quality and energy considerations. *Chem Eng Process Process Intensif* 98:155–164
36. Midilli A, Kucuk H, Yapar Z (2002) A new model for single-layer drying. *Dry Technol* 20:1503–1513
37. Mphahlele RR, Fawole OA, Makunga NP, Opara UL (2016) Effect of drying on the bioactive compounds, antioxidant, antibacterial and antityrosinase activities of pomegranate peel. *BMC Complement Altern Med* 16:143
38. Nowicka P, Wojdyło A, Lech K, Figiel A (2015) Influence of Osmodehydration pretreatment and combined drying method on the bioactive potential of sour cherry fruits. *Food Bioprocess Technol* 8:824–836
39. Onwude DI, Hashim N, Janius RB, Nawi NM, Abdan K (2016) Modeling the thin-layer drying of fruits and vegetables: a review. *Compr Rev Food Sci Food Saf* 15:599–618
40. Onwude DI, Hashim N, Abdan K, Janius R, Chen G (2018a) Modelling the mid-infrared drying of sweet potato: kinetics, mass and heat transfer parameters, and energy consumption. *Heat Mass Transf* 54:2917–2933
41. Onwude DI, Hashim N, Abdan K, Janius R, Chen G, Kumar C (2018b) Modelling of coupled heat and mass transfer for combined infrared and hot-air drying of sweet potato. *J Food Eng* 228:12–24
42. Overhults DG, White GM, Hamilton HE, Ross IJ (1973) Drying soybeans with heated air. *Trans ASAE* 16:112–113
43. Özdemir MB, Aktaş M, Şevik S, Khanlari A (2017) Modeling of a convective-infrared kiwifruit drying process. *Int J Hydrog Energy* 42:18005–18013
44. Page GE (1949) Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin-layers. M.S.Thesis, Purdue University, West Lafayette, Indiana.
45. Parlak N (2014) Fluidized bed drying characteristics and modeling of ginger (*zingiber officinale*) slices. *Heat Mass Transf* 51:1085–1095
46. Ramos KK, Lessio BC, Mecê ALB, Efraim P (2017) Mathematical modeling of uvaia byproduct drying and evaluation of quality parameters. *Food Sci Biotechnol* 26:643–651
47. Sacilik K (2007) Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (*Cucurbita pepo* L.). *J Food Eng* 79:23–30
48. Toğrul H (2006) Suitable drying model for infrared drying of carrot. *J Food Eng* 77:610–619
49. Toğrul İT, Pehlivan D (2002) Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers. *J Food Eng* 55:209–216
50. Venkitasamy C, Zhu C, Brandl MT, Niederholzer FJA, Zhang R, McHugh TH, Pan Z (2018) Feasibility of using sequential infrared and hot air for almond drying and inactivation of *Enterococcus faecium* NRRL B-2354. *LWT* 95:123–128
51. Viuda-Martos M, Fernández-López J, Pérez-Álvarez JA (2010) Pomegranate and its many functional components as related to human health: a review. *Compr Rev Food Sci Food Saf* 9:635–654
52. Wang C, Singh RP (1978) Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. *Trans Am Soc Agric Eng* 11:668–672
53. Yilmaz FM, Ksekkaya SY, Vardin H, Karaaslan M, (2017) The effects of drying conditions on moisture transfer and quality of pomegranate fruit leather (pestil). *J Saudi Soc Agric Sci* 16:33–40
54. Younis M, Abdelkarim D, Zein El-Abdein A (2018) Kinetics and mathematical modeling of infrared thin-layer drying of garlic slices. *Saudi J Biol Sci* 25:332–338
55. Zenoozian MS, Feng H, Razavi S, Shahidi F, Poureza H (2008) Image analysis and dynamic modeling of thin-layer drying of osmotically dehydrated pumpkin. *J Food Process Preserv* 32:88–102
56. Zielinska M, Michalska A (2016) Microwave-assisted drying of blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) fruits: drying kinetics, polyphenols, anthocyanins, antioxidant capacity, colour and texture. *Food Chem* 212:671–680

Publisher's note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Résumé

Cette thèse constitue une contribution à l'étude des méthodes de conservation de la grenade (*Punica granatum* L.) et leur effet sur la qualité de ce fruit.

Dans cette conception les effets de la température du stockage au froid sur les propriétés physico-chimiques de la grenade ont été étudiés. Il a été trouvé qu'une température de 0 à 3°C est recommandée pour la conservation des fruits de la grenade par réfrigération à 85-90% d'humidité relative. Les résultats de cette étude indiquent que la qualité nutritionnelle des fruits reste stable au cours d'une durée de conservation prolongée qui, dans certains cas, dépasse même quatre semaines.

Pour prolonger la durée de conservation des arilles, différents processus de séchage ont été appliqués (séchage convectif, infrarouge et par micro-onde assisté à l'air chaud). Les différentes méthodes de séchage ont des effets variés non seulement sur le temps de séchage, mais également sur la qualité des produits.

Généralement, la technique de séchage par micro-onde assisté à l'air chaud est restée la meilleure méthode de séchage utilisée pour réduire la teneur en eau des arilles et contribue également à maintenir la qualité des arilles.

Les méthodes de séchage affectent principalement la qualité nutritionnelle et organoleptique (macromolécules, vitamines et couleur) des produits finis en raison du temps de séchage plus long. Pour surmonter la dégradation de la qualité l'utilisation de prétraitements tels que « le champ électrique pulsé et les ultrasons » ont été appliqués, pour améliorer le processus de séchage et par la suite à des produits de haute qualité car il diminue le temps de séchage. Il a été démontré dans cette étude que l'augmentation de la force du champ électrique jusqu'à 1,5 kV/cm entraînait une amélioration dans le processus de séchage. Il a également été constaté que le prétraitement par ultrasons à 30 min suivi par un séchage par micro-onde assisté à l'air chaud réduit le temps de séchage sans entraîner une altération qualitative dans les arilles.

Mot clés : Grenade, Méthodes de conservation, Conservation par froid, Séchage, Champ électrique pulsé, ultrasons.

Abstract

This thesis constitutes a contribution to the study of methods of preserving pomegranate (*Punica granatum* L.) and their effect on the quality of this fruit.

In this design the effects of cold storage temperature on the physico-chemical properties of the pomegranate were studied. He found that a temperature of 0-3°C is recommended for storing pomegranate fruits by refrigeration at 85-90% relative humidity. The results of this study indicate that the nutritional quality of the fruit remains stable over an extended shelf life which in some cases even exceeds four weeks.

To extend the shelf life of the arils, different drying processes have been applied (convective, infrared and microwave drying assisted with hot air). Different drying methods have varying effects not only on drying time, but also on product quality.

Generally, the hot air assisted microwave drying technique is still the best drying method used to reduce the water content of the arils and also helps to maintain the quality of the arils.

The drying methods mainly affect the nutritional and organoleptic quality (macromolecules, vitamins and color) of the finished products due to the longer drying time. To overcome the degradation of quality the use of pretreatments such as "pulsed electric field and ultrasound"; have been applied, to improve the drying process and subsequently to high quality products as it decreases the drying time. It was shown in this study that increasing the strength of the electric field up to 1.5 kV/cm leads to an improvement in the drying process. It was also found that the 30 min ultrasonic pretreatment followed by hot air assisted microwave drying reduces the drying time without causing a qualitative alteration in the arils.

Keywords: Pomegranate, Preservation methods, Drying, Cold preservation, Pretreatment, Pulsed electric field, Ultrasound.

ملخص

تشكل هذه الرسالة مساهمة في دراسة طرق حفظ الرمان وتأثيرها على جودة هذه الفاكهة في هذا التصميم تمت دراسة تأثيرات درجة حرارة التخزين البارد على الخواص الفيزيائية والكيميائية للرمان. وجد أن درجة حرارة 0-3 درجة مئوية موصى بها لتخزين ثمار الرمان عن طريق التبريد عند 85-90% رطوبة نسبية. تشير نتائج هذه الدراسة إلى أن الجودة الغذائية للفاكهة تظل مستقرة على مدى فترة صلاحية طويلة والتي تتجاوز في بعض الحالات أربعة أسابيع.

لإطالة العمر الافتراضي للرمان، تم تطبيق عمليات تجفيف مختلفة (التجفيف بالحمل الحراري، والأشعة تحت الحمراء، والتجفيف بالميكروويف بمساعدة الهواء الساخن). طرق التجفيف المختلفة لها تأثيرات متفاوتة ليس فقط على وقت التجفيف، ولكن أيضًا على جودة المنتج. بشكل عام، لا تزال تقنية التجفيف بالميكروويف بمساعدة الهواء الساخن هي أفضل طريقة تجفيف مستخدمة لتقليل محتوى الماء في الحبيبات وتساعد أيضًا في الحفاظ على جودة الحبيبات الرمان.

تؤثر طرق التجفيف بشكل أساسي على الجودة الغذائية والحسية (الجزئيئات الكبيرة والفيتامينات واللون) للمنتجات النهائية نظرًا لطول وقت التجفيف. للتغلب على تدهور الجودة استخدام المعالجات مثل "المجال الكهربائي النبضي والموجات فوق الصوتية"؛ تم تطبيقها لتحسين عملية التجفيف وبالتالي الحصول على منتجات عالية الجودة حيث يقلل من وقت التجفيف. تبين في هذه الدراسة أن زيادة شدة المجال الكهربائي حتى 1.5 كيلو فولت/سم تؤدي إلى تحسين عملية التجفيف. وجد أيضًا أن المعالجة بالموجات فوق الصوتية لمدة 30 دقيقة متبوعة بالتجفيف بمساعدة الهواء الساخن في الميكروويف يقلل من وقت التجفيف دون التسبب في تغيير نوعي في حبيبات الرمان.

الكلمات المفتاحية: الرمان، طرق الحفظ، التجفيف، الحفظ البارد، المعالجة المسبقة، المجال الكهربائي النبضي، الموجات فوق الصوتية.