

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



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

N°...../ISVSA/TA/2020

## THÈSE

Présentée par

**BECHAA Besma**

Pour l'obtention du diplôme de

Doctorat 3<sup>ème</sup> cycle (LMD)

Spécialité : SCIENCES DES ALIMENTS

Thème

**Contribution à l'étude de l'effet des prétraitements  
sur la conservation de l'ail**

### Devant le Jury:

<b>Président</b>	Prof. FAHLOUL Djamel	Professeur	Université de Batna 1
<b>Directeur</b>	Prof. ZITOUNI Bariza	Professeur	Université de Batna 1
<b>Co-Directeur</b>	Prof. AMIALI Malek	Professeur	ENSA Alger
<b>Examineur</b>	Prof. BERROUKCHE Abdelkrim	Professeur	Université de Saida
<b>Examinatrice</b>	Dr. FERHAT Radhia	M.C.A.	Université de Batna 1
<b>Examineur</b>	Dr. GUEROUI Yassine	M.C.A.	Université 8 Mai 1945-Guelma

Année Universitaire : 2020-2021

## ***REMERCIEMENTS***

Il est primordial de remercier « ALLAH » le Tout-Puissant de tout ce qu'il nous apporte dans la vie et de nous avoir donné la force et le courage pour mener à terme cette thèse de Doctorat.

Il m'est agréable de vous remercier particulièrement ma promotrice **Pr. ZITOUNI Bariza**; Professeur au département de technologie alimentaire, institut des Sciences Vétérinaires et des Sciences Agronomiques, l'université de Batna-1. Vous m'avez mis sur la voie du présent travail et vous m'avez fait l'honneur de diriger mes travaux. Votre haute compétence, votre disponibilité, vos conseils judicieux ont été pour moi une source inestimable de réconfort et d'encouragement.

J'adresse mes vifs remerciements et ma sincère gratitude à mon Co-promoteur **Pr. AMIALI Malek**; Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique national, Alger, d'avoir aidé mes travaux de recherche avec la rigueur scientifique. Je vous remercie particulièrement pour vos encouragements, vos soutiens constants, vos compétences, vos patiences et surtout vos judicieux conseils.

Je suis très honoré à remercier:

Monsieur le **Pr. FAHLOUL Djamel**, Professeur de Génie des Procédés au département de technologie alimentaire, Institut des Sciences Vétérinaires et des Sciences Agronomiques, l'université de Batna-1 et directeur du laboratoire de recherche LSA, pour l'honneur de présider le jury de ce travail. J'ai toujours admiré et apprécié son dévouement et sa compétence. Qu'il trouve dans ce présent travail, l'expression de ma considération respectueuse.

Monsieur **Pr. BERROUKCHE Abdelkrim**; Professeur à l'Université de Saida d'avoir accepté de participer à mon jury de thèse en qualité de rapporteur de mon travail, pour le temps consacré à la lecture de cette thèse.

**Dr. FERHAT Radhia**, maître conférence classe A et Chef de Département de Technologie Alimentaire, Institut des Sciences Vétérinaires et des Sciences Agronomiques, l'université de Batna-1 m'avoir fait l'honneur d'examiner ma thèse. Je vous remercie très sincèrement pour votre présence dans ce jury et soyez assurée Madame, tout mon respect et ma profonde considération.

Je remercie monsieur **Dr. GUEROUI Yassine**; maître conférence classe A et Chef de département de Biologie, Université 8 mai 1945- Guelma d'avoir accepté de participer au Jury de soutenance; je l'en remercie profondément.

Je souhaite remercier vivement notre équipe de recherche du Laboratoire Sciences des Aliments « **LSA** » ou j'ai eu la chance de faire ma partie expérimentale, pour les conseils qu'ils m'ont donnés tout au long de ma recherche, de m'avoir encouragés à participer à des échanges scientifiques (congrès et collaborations).

Je remercie toute l'équipe du laboratoire **LAPAPEZA** pour leur Accueil, leur coopération professionnelle, leur aide, leur disponibilité et leur énorme gentillesse à notre égard.

J'exprime ma gratitude à Monsieur le Professeur **BENCHABANE Ahmed**, Chef du département de technologie alimentaire et de Nutrition Humaine et Professeur à l'Ecole Nationale supérieure d'Agronomie, Alger, pour m'avoir accueilli au sein de ses laboratoires et pour la gentillesse qu'il m'a témoignée.

Tous mes remerciements vont également aux **Pr. Raghavan** et leur aimable équipe qui ont eu l'extrême gentillesse de m'accueillir deux fois au sein de leur laboratoire « Génie des ressources biologiques », Université de McGill, Canada. Je leur exprime ma reconnaissance pour les conditions de travail privilégiées qui m'ont été offertes, leur savoir scientifique qu'ils m'ont transmis et leur encouragement.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les enseignants de département technologie alimentaire, tous les professeurs, intervenants et toutes les ingénieurs de laboratoire de département technologie alimentaire et les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches.

A titre personnel, Je remercie chaleureusement mes parents, pour la grande patience, l'encouragement et la confiance qu'ils m'ont témoignés. Je tiens à les remercier surtout pour leur soutien moral ininterrompu et leurs nombreux conseils tout le long de ma thèse. Je remercie mes sœurs, et mon frère et sa petite famille et spécialement mon adorable neveu Anes, pour leurs encouragements.

J'adresse toute ma gratitude à mes amis pour leur soutien morale et physique et particulièrement **SAMIA** et sa famille pour m'avoir accueilli au sein de sa maison et de me considérer comme un membre de leur famille. Ainsi que tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont aidé pour la réalisation de la présente thèse.

# Table des matières

<b>Remerciement</b>	
<b>Liste des abréviations</b>	
<b>Liste des figures</b>	
<b>Liste des tableaux</b>	
<b>Introduction</b> .....	1

## *Partie I: Synthèse bibliographique*

### **Chapitre 1: Généralités sur l'ail**

1. Historique .....	9
2. Présentation .....	10
2.1. Etymologie .....	10
2.2. Classification Botanique .....	10
2.3. Description botanique .....	11
3. Composition Biochimique de l'ail .....	13
4. Classification des variétés de l'ail .....	14
5. Propriétés de l'ail .....	16
6. Production géographique de l'ail .....	17
6.1. Production d'ail dans le monde .....	17
6.2. Production d'ail en Algérie .....	17

### **Chapitre 2: Prétraitements:**

#### **Champ électrique pulsé, Déshydratation osmotique et Ultrason**

##### **I. Champ Electrique Pulsé**

1. Historique .....	21
2. Définition .....	22
3. Système de traitement par CEP .....	23
3.1. Générateur d'impulsions hautes tension .....	24
3.2. Chambre de traitement .....	24
3.3. Condensateur .....	25
3.4. Commutateur .....	25
4. Comportement des aliments dans un champ électrique pulsé .....	25
4.1. Effet du CEP sur la membrane .....	25
4.2. Effet du CEP sur les constituants alimentaires .....	26
4.3. Effet du CEP sur les qualités organoleptiques des aliments .....	27
5. Facteurs influençant le traitement par CEP .....	27
5.1. Intensité du CEP .....	27
5.2. Type de pulsation .....	27
5.3. Durée d'impulsion .....	27
5.4. Temps du traitement .....	28
5.5. Température du traitement .....	28
5.6. Conductivité électrique du milieu .....	29
6. Détection de la perméabilisation cellulaire .....	29
7. Applications du CEP .....	30



## **II. Déshydratation osmotique (DO)**

1. Historique .....	31
2. Définition .....	31
3. Principaux facteurs influençant les performances de la DO .....	32
3.1. Propriétés des tissus biologiques.....	32
3.2. Conditions opératoires du traitement .....	32
4. Méthodes de la déshydratation osmotique .....	34
5. Cinétique de la déshydratation osmotique .....	34
6. Applications de la déshydratation osmotique.....	35
6.1. Préparation des fruits au sirop.....	35
6.2. Déshydro-congélation .....	36
6.3. Traitements osmotiques combinés avec séchage .....	36
7. Intérêt de la déshydratation osmotique.....	36

## **III. Ultrason**

1. Historique .....	36
2. Système d'ultrason.....	37
3. Principe.....	37
4. Classification des ultrasons .....	38
5. Installation ultrasonique .....	38
6. Facteurs influençant la cavitation.....	39
7. Mécanisme d'action .....	40
8. Applications de la technologie des ultrasons dans la transformation alimentaire.....	41

## **Chapitre 3: Méthodes de conservation**

1. Différentes techniques de conservation.....	44
2. Conservation par le séchage .....	44
2.1. Objectif du séchage .....	45
2.2. Mécanismes intervenants au cours du séchage .....	45
2.2.1. Transferts de la chaleur .....	45
2.2.2. Transferts de matière.....	46
2.3. Cinétique de séchage.....	46
2.4. Méthodes de séchage.....	48
2.5. Avantages et les inconvénients du séchage.....	48
2.6. Quelques méthodes du séchage appliquées sur l'ail .....	49
3. Conservation à froid .....	49
3.1. Techniques de conservation par le froid .....	49
3.1.1. Réfrigération .....	49
3.1.2. Congélation .....	50
3.1.3. Surgélation .....	51
4. Entreposage de l'ail .....	53

## ***Partie II : Partie Expérimentale***

### **Chapitre 1: Caractérisation d'une variété de l'ail de la région de Skikda (Algérie)**

#### **Résumé**

1. Introduction .....	60
2. Matériaux et méthodes .....	60
2.1. Matériel végétal .....	60
2.2. Propriétés physiques de l'ail.....	61
2.3. Mesure de la couleur .....	62
2.4. Propriétés chimiques .....	62

2.4. Concentration en nutriments minéraux .....	64
2.5. Analyses statistiques.....	64
3. Résultats et discussion.....	65
3.1. Propriétés biométriques .....	65
3.2. Couleur .....	65
3.3. Teneur en polyphénols totaux.....	68
3.4. Activité antioxydante .....	68
3.5. Concentration en nutriments minéraux .....	69
<b>Conclusion</b> .....	<b>70</b>

## **Chapitre 2: Etude comparative du séchage convectif et du séchage par microonde assisté à l'air chaud des tranches de l'ail**

### **Résumé**

1. Introduction .....	72
2. Matériels et méthodes .....	74
2.1. Matière végétale .....	74
2.2. Séchage convectif.....	74
2.3. Séchage à microonde assisté à l'air chaud .....	74
2.4. Modélisation mathématique du séchage.....	75
2.5. Détermination de couleur .....	77
2.6. Détermination de texture .....	77
2.7. Dosage des polyphénols .....	77
2.8. Mesure d'activité antioxydante .....	78
2.9. Analyses statistiques.....	79
3. Résultats et discussion .....	79
3.1. Cinétique de séchage .....	79
3.2. Modélisation des données de séchage .....	81
3.3. Diffusivité effective .....	83
3.4. Energie d'activation.....	84
3.5. Couleur .....	84
3.6. Texture.....	86
3.7. Teneur en polyphénols totaux.....	86
3.8. Activité antioxydante.....	86
<b>Conclusion</b> .....	<b>88</b>

## **Chapitre 3: Deshydratation osmotique**

### **Résumé**

1. Introduction .....	91
2. Matériels et méthodes .....	93
2.1. Matériel végétal.....	93
2.2. Traitement de déshydratation osmotique .....	93
2.3. Séchage convectif.....	93
3. Résultats et discussion .....	94
3.1. Déshydratation osmotique.....	94
3.2. Taux d'humidité et vitesse de séchage.....	97
3.3. Diffusivité efficace .....	99
3.4. Énergie d'activation .....	100
<b>Conclusion</b> .....	<b>100</b>

## Chapitre 4: Effet du champ électrique pulsé (CEP) sur le séchage de l'ail

### I. Effets du traitement par CEP sur la membrane

#### Résumé

1. Introduction .....	102
2. Matériels et méthodes .....	103
2.1. Matière végétale .....	103
2.2. Champ électrique pulsé (CEP) .....	104
2.3. Conductivité.....	105
2.4. Détermination de la désintégration cellulaire.....	105
2.5. Microscopie électronique à balayage .....	105
2.6. Détermination de couleur.....	106
3. Résultats et discussion.....	106
3.1. Conductivité électrique des échantillons traités par CEP.....	106
3.2. Indice de désintégration cellulaire .....	107
3.3. Microscope électronique à balayage .....	108
3.4. Effet du CEP sur la couleur.....	111
<b>Conclusion.....</b>	<b>112</b>

### II. Effet du champ électrique pulsé (CEP) sur les tranches d'ail séchés par micro-ondes assistées à l'air chaud

#### Résumé

1. Introduction .....	113
2. Matériels et méthodes.....	116
2.1. Matière végétale .....	116
2.2. Champ électrique pulsé (CEP) .....	116
2.3. Conductivité .....	116
2.4. Détermination de la désintégration cellulaire.....	117
2.5. Microscopie électronique à balayage .....	117
2.6. Séchage à microonde assisté à l'air chaud .....	117
2.7. Modélisation mathématique du séchage.....	118
2.8. Détermination de la couleur .....	119
2.9. Tests de texture.....	119
2.10. Mesure d'activité antioxydante.....	120
2.11. Analyses statistiques .....	121
3. Résultats et discussion.....	121
3.1. Effet du CEP sur la conductivité électrique .....	121
3.2. Perméabilité à la membrane cellulaire .....	123
3.3. Microscopie électronique à balayage .....	124
3.4. Taux d'humidité.....	124
3.5. Évaluation des modèles de séchage.....	127
3.6. Diffusivité effective .....	129
3.7. Énergie d'activation.....	131
3.8. Couleur .....	131
3.9. Effet du CEP sur les propriétés texturales .....	132
3.10. Teneur en polyphénols totaux .....	133
3.11. Activité antioxydante .....	133
<b>Conclusion.....</b>	<b>136</b>

### **III. Etude de l'effet du champ électrique pulsé sur le séchage convectif des tranches de l'ail**

#### **Résumé**

1. Introduction .....	137
2. Matériels et méthodes .....	138
2.1. Matière végétale .....	138
2.2. Champ électrique pulsé (CEP) .....	139
2.3. Séchage convectif.....	139
2.4. Modélisation mathématique du séchage .....	139
2.5. Détermination de couleur.....	140
2.6. Tests de texture.....	141
2.7. Dosage des polyphénols .....	141
2.8. Mesure d'activité antioxydante .....	142
2.9. Analyses statistiques .....	142
3. Résultats et discussion .....	142
3.1. Cinétique .....	142
3.2. Modélisation mathématique des courbes de séchage .....	144
3.3. Diffusivité efficace .....	146
3.4. Energie d'activation .....	146
3.5. Couleur .....	147
3.6. Texture.....	148
3.7. Teneur en polyphénols totaux .....	150
3.8. Capacité d'activité antioxydante .....	151
<b>Conclusion.....</b>	<b>153</b>

### **Chapitre 5: Effet du prétraitement aux ultrasons sur le séchage convectif et le séchage au microonde assisté à l'air chaud des tranches de l'ail**

#### **Résumé**

1. Introduction .....	155
2. Matériels et méthodes .....	156
2.1. Matière végétale .....	156
2.2. Prétraitement par ultrason.....	157
2.3. Microscopie électronique à balayage .....	157
2.4. Séchage convectif.....	157
2.5. Séchage à microonde assisté à l'air chaud.....	157
2.6. Modélisation mathématique du séchage .....	158
2.7. Énergie d'activation.....	159
2.8. Détermination de couleur.....	159
2.9. Tests de texture.....	160
2.10. Dosage des polyphénols .....	160
2.11. Mesure d'activité antioxydante.....	161
2.12. Analyses statistiques .....	161
3. Résultats et discussions .....	161
3.1. Microscopie électronique à balayage .....	161
3.2. Cinétique du séchage .....	162
3.3. Modélisation des courbes de séchage.....	168
3.4. Diffusivité effective .....	171
3.5. Energie d'activation.....	173

3.6. Couleur .....	174
3.7. Texture.....	177
3.8. Teneur en polyphénols totaux.....	179
3.9. Activité antioxydante.....	180
<b>Conclusion.....</b>	<b>181</b>

## **Chapitre 6: Effet du champ électrique pulsé sur la conservation par le froid de l’ail haché**

### **Résumé**

1. Introduction .....	184
2. Matériels et méthodes .....	186
2.1. Matière végétale .....	186
2.2. Prétraitement par champs électriques pulsés .....	186
2.3. Conditions expérimentales de stockage et durée de conservation.....	186
2.4. Détermination du ph .....	186
2.5. Évaluation de couleur .....	187
2.6. Mesure des pertes d'eau .....	187
2.7. Dosage des polyphénols .....	187
2.8. Mesure d’activité antioxydant .....	188
2.9. Analyses statistiques .....	189
3. Résultats et discussion .....	189
3.1. Détermination de perte de poids.....	189
3.2. Changements de la couleur .....	192
3.3. Changements de polyphénols totaux pendant le stockage.....	193
3.4. Changements dans la capacité antioxydant pendant le stockage .....	195
3.5. Mesure des pertes d'eau .....	195
<b>Conclusion.....</b>	<b>196</b>

### **Références**

<b>Conclusion générale .....</b>	<b>199</b>
<b>Références Bibliographiques</b>	

### **Résumé**

## Liste d'abréviation

<b>%</b>	: Pour cent
<b><math>\Delta E</math></b>	: Différence totale de la couleur
<b>°C</b>	: Degré Celsius
<b><math>\mu s</math></b>	: Microseconde
<b>A</b>	: Absorbance
<b>AC</b>	: Activité Antioxydante
<b>AOAC</b>	: Association de chimiste analytique
<b>APG</b>	: Groupe des angiospermes phylogéniques
<b>Aw</b>	: Activité water
<b>CD</b>	: Convective Drying
<b>CEP</b>	: Champ électrique pulsé (Kv/cm)
<b>CIE</b>	: Commission internationale de l'éclairage
<b>cm</b>	: Centimètre
<b>D</b>	: Diamètre (mm)
<b>D<sub>eff</sub></b>	: Diffusivité efficace (m <sup>2</sup> /s)
<b>DPPH</b>	: 1,1-diphényl-2-picryl-hydrazil
<b>f</b>	: Fréquence (Hz)
<b>FAO</b>	: Food and Agriculture Organisation
<b>FIRD</b>	: séchage par rayonnement infrarouge lointain
<b>FNT</b>	: Nucleation freezing temperature
<b>FT</b>	: Freezing temperature
<b>g</b>	: Gramme
<b>H(%)</b>	: Humidité
<b>h:</b>	: Coefficient de transfert de chaleur (W/m <sup>2</sup> °C)
<b>HAD</b>	: Séchage à l'air chaud
<b>HPD</b>	: séchage par pompe à chaleur
<b>HPH</b>	: Haute pression hydrostatique
<b>i</b>	: Intensité électrique (A)
<b>IAA</b>	: Industrie agroalimentaire
<b>Kv</b>	: Kilo volt
<b>L</b>	: épaisseur de l'échantillon (m)
<b>m</b>	: Masse (g)
<b>MEB</b>	: Microscope électronique à balayage
<b>mg</b>	: Milligramme
<b>MHz</b>	: Mégahertz
<b>min</b>	: Minute
<b>ml</b>	: Millilitre
<b>mm</b>	: Millimètre
<b>MR</b>	: Taux d'humidité (kg d'eau / kg de MS).
<b>MS</b>	: Matière sèche (%)
<b>nm</b>	: Nanomètre
<b>PG</b>	: Perte de goutte
<b>pH</b>	: Potentiel d'hydrogène
<b>R</b>	: Résistance ( $\Omega$ )
<b>S</b>	: Seconde
<b>S</b>	: Siemens
<b>SD</b>	: séchage au soleil
<b>SM</b>	: Séchage à l'air chaud
<b>SMAC</b>	: Séchage au microonde assisté à l'air chaud
<b>T</b>	: Temps (s)
<b>T°</b>	: Température (°C)
<b>TPC</b>	: Contenu des Polyphénols totaux

**US** : Ultrasons  
**UV** : Ultraviolet  
**W** : Watt  
**Z** : Indice de perméabilisation  
 **$\Delta$**  : Conductivité électrique (Sm<sup>-1</sup>)  
 **$\sigma$**  : Constante de Stefan-Boltzman (w/m<sup>2</sup>k<sup>4</sup>)

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1:</b>	Classification botanique de l'ail	10
<b>Tableau 2:</b>	Valeur nutritionnelle de l'ail frais	14
<b>Tableau 3:</b>	Production de l'ail en Algérie (2009- 2016)	18
<b>Tableau 4:</b>	Superficie des cultures d'ail dans hauts plateaux d'Est (2015-2016)	19
<b>Tableau 5:</b>	Synthèse bibliographique de quelques travaux sur l'ail	53
<b>Tableau 6:</b>	Caractéristiques générales de l'ail	62
<b>Tableau 7:</b>	Caractéristique morphologique de l'ail	65
<b>Tableau 8:</b>	Profil de couleur des différentes parties de l'ail	66
<b>Tableau 9:</b>	Caractéristiques physicochimiques de l'ail frais	67
<b>Tableau 10:</b>	Teneur en minéraux de l'ail	69
<b>Tableau 11:</b>	Modèles mathématiques utilisés pour décrire la courbe du séchage des tranches de l'ail en couche mince	76
<b>Tableau 12:</b>	Qualité d'adaptation des modèles du séchage aux micro-ondes assistées à l'air chaud et séchage à l'air chaud aux différentes températures	82
<b>Tableau 13:</b>	Effets de la température sur la dureté des tranches d'ail séchées au SC et au SMAC	86
<b>Tableau 14:</b>	Effets du prétraitement CEP sur la couleur des tranches d'ail	112
<b>Tableau 15:</b>	Qualité d'adaptation des modèles du séchage aux SMAC aux différentes températures prétraités au CEP	128
<b>Tableau 16:</b>	Effets du prétraitement au CEP sur la couleur et la dureté des tranches d'ail séché au séchage SMAC	132
<b>Tableau 17:</b>	Qualité d'adaptation des modèles du séchage au SC prétraité par CEP aux différentes températures	145
<b>Tableau 18:</b>	Dureté des tranches de l'ail séchés au SC et prétraité par CEP	150
<b>Tableau 19:</b>	Qualité d'adaptation des modèles du séchage au SMAC et prétraité par ultrason aux différentes températures	168
<b>Tableau 20:</b>	Qualité d'adaptation des modèles du séchage au SC et prétraité par ultrason aux différentes températures	170
<b>Tableau 21:</b>	Dureté des tranches de l'ail séchés par les deux méthodes et aux différentes températures	178



## Liste des figures

<b>Figure 1:</b>	Schéma général d' <i>Allium sativum</i>	12
<b>Figure 2:</b>	Schéma de la bulbe d' <i>Allium sativum</i>	13
<b>Figure 3:</b>	Principaux composés organosoufrés présents dans différents dérivés d'ail	14
<b>Figure 4:</b>	Cultivars d'ail: a) Blanc, b) Violet, c) Rose, d) Pourpre.	16
<b>Figure 5:</b>	Répartition mondiale de la culture d'ail en 2018 selon l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture	18
<b>Figure 6:</b>	Schéma d'un système de champ électrique pulsé pour le traitement des aliments	23
<b>Figure 7:</b>	Schéma électrique du système de CEP	23
<b>Figure 8:</b>	Schémas des chambres de traitement aux électrodes parallèles	24
<b>Figure 9:</b>	Schémas explicatifs de l'effet du CEP sur la membrane cellulaire	26
<b>Figure 10:</b>	Formes typiques des impulsions	28
<b>Figure 11:</b>	Représentation schématisée du phénomène d'osmose	32
<b>Figure 12:</b>	Montage expérimental d'un système ultrasonique	39
<b>Figure 13:</b>	Modes de transfert lors du séchage	46
<b>Figure 14:</b>	Courbes d'évolution de la teneur en eau du produit au cours du temps	46
<b>Figure 15:</b>	Cristallisation de la glace: (I) congélation lente, (II) réfrigération rapide	51
<b>Figure 16:</b>	Matériel végétal étudié: a) le bulbe, b) les gousses, c) les tranches et d) l'ail haché	61
<b>Figure 17:</b>	Positionnement de différentes parties de l'ail sur le cercle chromatique	66
<b>Figure 18:</b>	Diagramme de chromacité et clarté des différentes parties de l'ail	67
<b>Figure 19:</b>	Schéma d'un micro-ondes assisté à l'air chaud	75
<b>Figure 20:</b>	Teneur en humidité des tranches de l'ail aux différentes températures	80
<b>Figure 21:</b>	Coefficient de diffusivité efficace aux différentes températures	83
<b>Figure 22:</b>	Variation des paramètres de couleur des tranches de l'ail séchés: a) séchage convectif (SC), b) séchage au microonde assisté à l'air chaud (SMAC)	85
<b>Figure 23:</b>	Teneur en polyphénols totaux de l'ail séché au SMAC et SC	87
<b>Figure 24:</b>	Activité antioxydante de l'ail séché au SMAC et SC	88
<b>Figure 25:</b>	Cinétique de la perte d'eau et du gain de solides des tranches de l'ail pendant la déshydratation osmotique	96
<b>Figure 26:</b>	Teneur en humidité des tranches de l'ail non prétraités en fonction du temps de séchage	98
<b>Figure 27:</b>	Teneur en humidité des tranches de l'ail prétraités en fonction du temps de séchage	98
<b>Figure 28:</b>	Taux de séchage des tranches de l'ail non prétraités en fonction de la teneur en humidité	99
<b>Figure 29:</b>	Taux de séchage des tranches de l'ail prétraités en fonction de la teneur en humidité	99
<b>Figure 30:</b>	Schéma d'un système du champ électrique pulsé	104
<b>Figure 31:</b>	Installation du champ électrique pulsé	104
<b>Figure 32:</b>	Relation entre le nombre des impulsions et la conductivité électrique des tranches de l'ail traitées au CEP	106
<b>Figure 33:</b>	Indice de désintégration cellulaire des tranches de l'ail prétraitées au CEP en fonction du nombre d'impulsion	108
<b>Figure 34:</b>	Micrographies électroniques à balayage des tranches de l'ail	110
<b>Figure 36:</b>	Relation entre le nombre des impulsions et la conductivité électrique des tranches de l'ail traitées au CEP	123
<b>Figure 37:</b>	Indice de désintégration cellulaire des tranches de l'ail prétraitées au CEP en fonction du nombre d'impulsion	123
<b>Figure 38:</b>	Micrographies électroniques à balayage des tranches de l'ail	125
<b>Figure 39:</b>	Evolution de la teneur en humidité des tranches de l'ail lors du SMAC aux différentes températures	126
<b>Figure 40:</b>	Diffusivité effective lors du séchage SMAC en fonction de l'intensité du champ	130
<b>Figure 41:</b>	Teneur en polyphénols totaux de l'ail séché au SMAC et prétraités au CEP	134
<b>Figure 42:</b>	Activité antioxydante de l'ail séché au SMAC et prétraités au CEP	135

<b>Figure 43:</b>	Evolution de la teneur en humidité pendant le séchage SC des tranches d'ail aux différentes températures : a) non traité au CEP, b): traités par CEP	143
<b>Figure 44:</b>	Diffusivité effective lors du séchage SC en fonction de l'intensité du champ électrique	147
<b>Figure 45:</b>	Variation des paramètres de couleur des tranches de l'ail séchés au SC prétraité par CEP	149
<b>Figure 46:</b>	Teneur en polyphénols totaux de l'ail séché à l'air chaud et prétraités par CEP	151
<b>Figure 47:</b>	Activité antioxydant de l'ail séché au SC et prétraités par CEP	153
<b>Figure 48:</b>	Micrographie électronique à balayage des tranches de l'ail prétraités par ultrason	163
<b>Figure 49:</b>	L'influence de l'ultrason et de la température sur la teneur en humidité des tranches de l'ail lors du SMAC	164
<b>Figure 50:</b>	L'influence de l'ultrason et de la température sur la teneur en humidité des tranches de l'ail lors du SC	165
<b>Figure 51:</b>	Coefficient de diffusivité efficace aux différentes températures (SMAC)	172
<b>Figure 52:</b>	Coefficient de diffusivité efficace aux différentes températures (SC)	173
<b>Figure 53:</b>	Tranches de l'ail et séché AU SC: a) non traités aux ultrasons, b) traités aux ultrasons	175
<b>Figure 54:</b>	Variation des paramètres de couleur des tranches de l'ail séchés au SMAC et prétraité par ultrason	176
<b>Figure 55:</b>	Variation des paramètres de couleur des tranches de l'ail séchés au SC prétraité par ultrason	177
<b>Figure 56:</b>	Contenu des composés phénoliques totaux des tranches d'ail séchées et prétraités aux ultrasons aux différentes températures	179
<b>Figure 57:</b>	Capacité antioxydant des tranches d'ail prétraités aux ultrasons et séchées aux différentes températures	181
<b>Figure 58:</b>	Evolution du poids de l'ail haché au cours de la conservation	190
<b>Figure 59:</b>	Evolution du pH de l'ail haché au cours de la conservation	191
<b>Figure 60:</b>	Changement des pertes en eau des d'ail haché congelés à (-18°C)	192
<b>Figure 61:</b>	Evolution des polyphénols totaux au cours de la conservation par froid	194
<b>Figure 62:</b>	Evolution d'activité antioxydante au cours de la conservation par froid	196

# **Introduction Générale**

La culture vivrière mondiale de l'ail (*Allium sativum*), se classant quatrième parmi les autres cultures avec une production annuelle globale de près de 327 millions de tonnes et environ 19 millions d'hectares plantés. La Chine, l'Inde, la République de Corée et les États-Unis sont les principaux pays producteurs d'ail (**Samavatean et al., 2011; Sun et al., 2020**). La production d'ail en Algérie reste faible contrairement à la production et à la consommation des autres légumes.

L'ail est classé dans la famille des Alliacees, et est largement consommé pour ses bienfaits culinaires et médicaux. L'ail est une source relativement bonne de calcium, de phosphore et de potassium (**Samavatean et al., 2011; Feng et al., 2020**). Les composés organosulfurés de l'ail sont connus pour être responsables de leur forte odeur caractéristique, mettant en évidence l'allicine, un thiosulfinate responsable de la plupart des activités biologiques de l'ail, comme les propriétés antibiotiques, antivirales et antifongiques et les composés phénoliques, qui sont fortement liés à l'activité antioxydante (**Cavalcanti et al., 2020; Feng et al., 2020**).

La teneur élevée en eau des gousses d'ail fraîches, qui représente plus de 75% (base Web), rend l'ail sujet à une germination rapide et à la pourriture pendant le stockage, ce qui se traduit par une durée de conservation plus courte et par conséquent, de grandes pertes économiques pour les vendeurs (**Papu et al., 2014**). Cependant, des méthodes de conservation appropriées sont nécessaires pour prolonger la durée de conservation et maintenir la valeur nutritionnelle de l'ail pour une meilleure commercialisation (**Feng et al., 2020; Sharma et al., 2020**).

La conservation implique généralement des technologies qui empêchent la croissance microbienne et retardent les réactions de dégradation des qualités sensorielles et nutritionnelles des aliments au cours de l'entreposage. Il comprend des méthodes telles que l'irradiation, le séchage, la conservation par froid (la congélation et la réfrigération), et la conservation chimiques (**Narashans et Sunil, 2020**).

Les processus de séchage peuvent éliminer 90% de l'eau contenue dans les denrées alimentaires, retarder la détérioration causée par la croissance des micro-organismes, atténuer la réaction de dégradation induite par l'eau afin d'allonger la durée de conservation. En outre, la demande d'ail séché, sous forme de tranches ou de poudre, a augmenté en raison de son utilisation répandue comme ingrédient dans les aliments précuits et les plats cuisinés instantanés (**Feng et al., 2020**).

La conservation par froid est une technique qui assure une température basse du produit. Cette température est un facteur primordial de prolongation de la durée de conservation et garantit la qualité des aliments. De plus, elle minimise la fréquence respiratoire, les réactions de détérioration et la croissance de microorganismes pathogènes (**Liu et al., 2020**).

Ces techniques de conservation sont fréquemment utilisées pour la conservation mais détériorent parfois les attributs de qualité des matières alimentaires. Récemment, des prétraitements peuvent améliorer considérablement les performances de ces différentes techniques de conservations. En fait, plusieurs technologies sont évaluées, telles que les champs électriques pulsés (**Lebovka et al., 2007**), blanchiment, la déshydratation osmotique la technologie haute pression et l'ultrason (**de Oliveira et al., 2015**).

Le champ électrique pulsé (CEP) est une technologie non thermique. Le CEP est capable d'améliorer les processus de diffusion dans les tissus végétaux et réduire la consommation d'énergie. L'application d'un champ électrique externe se traduit par un potentiel transmembranaire accru des membranes cellulaires, des changements structurels et la formation réversible ou irréversible de pores dans les membrane (**Moens et al., 2020**).

La déshydratation osmotique est un processus de prétraitement, qui dépend du phénomène de diffusion de l'humidité à partir des matières alimentaires par immersion dans une solution hypertonique. Cela entraîne une réduction de la teneur en humidité jusqu'à 50% du poids des fruits et légumes frais. Il permet de réduire la consommation énergétique et d'améliorer la qualité des produits.

Les technologies liées aux ultrasons sont généralement économiques, simples à utiliser et l'opération ne nécessite pas de réactifs chimiques externes ni d'additifs. En effet, la technologie des ultrasons a été largement utilisée dans le contrôle non destructif des aliments, le séchage des aliments, la stérilisation, la congélation, décongélation et d'autres domaines de la transformation et du stockage des aliments (**Jiang et al., 2020**).

Il existe de nombreuses études liées à l'ail séché utilisant différentes techniques telles que les micro-ondes sous vide, l'air chaud, les micro-ondes, l'infrarouge, la lyophilisation, mais principalement l'effet de la température et de l'épaisseur des tranches ont été discutés. Par contre d'autres, ils ont étudié la conservation par congélation des gousses d'ail (**Baysal et al., 2003; Cui et al., 2003; Ertekin et Yaldiz, 2004; Sacilik et Unal, 2005; Sablani et al., 2007; Figiel, 2009; Thorat, 2011; Calín-Sánchez et al., 2014; Yabin Feng et al., 2020**).

Jusqu'à présent, il n'y a pas d'étude systématique et complète sur les effets des différents prétraitements et des différentes techniques de conservation sur les caractéristiques physiques, de composés bioactifs (polyphénols) et d'antioxydants de l'ail, ce qui est essentiel pour choisir une technique de conservation plus appropriée pour obtenir une qualité particulièrement idéale des produits à l'ail.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le travail de cette thèse. Il est donc essentiel d'étudier l'effet des différents prétraitements sur les méthodes de conservation de l'ail. Cette thèse est organisée comme suite:

### **La partie bibliographique se divise en trois chapitres**

Le premier chapitre est une étude bibliographique consacrée à des généralités essentielles sur l'ail. Le deuxième Chapitre est consacré à la description du procédé de chaque prétraitement tel que le champ électrique pulsé (CEP), la déshydratation osmotique (DO) et l'ultrason. Le troisième chapitre présente les méthodes couramment utilisées pour la conservation des légumes: séchage et conservation par froid tel que la réfrigération, la congélation et la surgélation.

**La partie expérimentale** présente les démarches expérimentales adoptées pour répondre aux objectifs. Cette partie est déclinée en six chapitres.

**Chapitre 1:** Le but de ce chapitre est d'étudier les propriétés morphologiques et physico-chimiques de l'ail. La caractérisation physicochimique a impliqué une évaluation colorimétrique des gousses d'ail, une analyse mécanique de la texture, la teneur en phénols totaux et l'évaluation de l'activité antioxydante l'ail cultivé dans la région de Harrouche (Skikda) en Algérie.

**Chapitre 2:** L'objectif de cette étude était d'évaluer l'effet des deux techniques de séchage (séchage convectif et micro-onde assisté à l'air chaud) sur les caractéristiques des tranches de l'ail séchés qui ont le plus influencé l'acceptation par le consommateur, principalement la couleur et la texture et d'autre part modéliser la cinétique de séchage.

**Chapitre 3:** Cette étude rapporte l'effet des facteurs de la DO sur le gain en soluté et la perte en eau. Ainsi l'effet de la DO sur la cinétique du séchage des tranches de l'ail.

**Chapitre 4:** La première partie est dédiée à la caractérisation de l'endommagement des cellules par le traitement électriques (CEP). La caractérisation s'appuie sur une mesure de la conductivité et l'indice de désintégration de la membrane de l'ail traité traités et leurs textures (visualisation de la perméabilisation cellulaire).

La deuxième partie de ce chapitre est concentré sur l'étude et l'évaluation de l'effet des champs électriques pulsés (CEP) sur; (a) la cinétique des deux méthodes de séchage (SC et SMAC) et (b) les caractéristiques de qualité (couleur, texture, capacité antioxydant et composés phénoliques totaux) des tranches de l'ail séchés. Le but est d'évaluer une combinaison optimisée de technologies non thermiques du CEP en tant qu'étape de prétraitement au séchage à fin d'aboutir à un produit de l'ail séché de haute qualité.

**Chapitre 5:** Ce chapitre a étudié l'impact des ultrasons comme un prétraitement sur les caractéristiques de séchage. Une comparaison de la qualité des tranches de l'ail déshydratées en

termes de composés polyphénol, l'activité antioxydante et la couleur et la texture a été faite.

De plus, la modélisation mathématique est appliquée pour évaluer le caractère du séchage pour déterminer certains effets positifs découlant de l'action des ultrasons dans les processus de séchage.

**Chapitre 6:** L'objectif de ce chapitre était l'amélioration de la congélation au moyen du champ électrique pulsé (CEP) comme prétraitement. La qualité des tranches de l'ail congelé-décongelé a été évaluée au moyen de mesures de perte de masse, de couleur, d'activité antioxydante et des polyphénols totaux.

Ces travaux de recherches sont couronnés par deux publications et onze communications entre communication nationale et internationale avec une participation comme Co-promotrice dans trois travaux fins d'étude (Master 2) ci-dessous:

### **1. Publications internationales**

1. **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.
2. 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. Communications dans des conférences internationales**

1. **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.
2. 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.
3. **BECHAA Besma**, ZITOUNI Guelma-Algérie.Bariza, BRIKI Samia, AMIALI Malek.Optimisation de la déshydratation osmotique des tranches d'*Alluim savitum 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. 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.

5. **BECHAA Bisma**, 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.
6. BRIKI Samia, ZITOUNI Bariza, **BECHAA Bisma**, 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.
7. **BECHAA Bisma**, 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. 26-27Avril 2017. Mostaganem-Algérie.
8. BRIKI Samia, ZITOUNI Bariza, **BECHAA Bisma**, 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. 26-27Avril 2017. Mostaganem-Algérie.
9. **BECHAA Bisma**, ZITOUNI Bariza, BRIKI Samia. Etude expérimentale de séchage par convection et infrarouge des tranches de l'ail (*Allium Sativum* L.). 10<sup>ème</sup> 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. BRIKI Samia, ZITOUNI Bariza, **BECHAA Bisma**. 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.

### **3. Participation Aux Manifestations Scientifiques**

1. Participation dans la 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.
2. Participation dans l'organisation de la 1ère Journée Nationale sur la Nutrition et la Sécurité Alimentaire JNNSA. Tenues le 13 Décembre 2017 à 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. Co-Encadrement de master soutenu** au département de technologie alimentaire, institut des sciences vétérinaires et des sciences agronomiques, université de Batna 1

1. LEGERA Nassim, Bekhouche Koussila, ZITOUNI Bariza et **BECHAA Bisma**, (2016). Etude de la déshydratation osmotique des tranches d'ail et son effet sur le séchage. Mémoire de master.
2. Garah Aya Gazzaniya Meriem, ZITOUNI Bariza et **BECHAA Bisma**, (2018). Effet de la conservation par le froid sur quelques caractéristiques morphologies et physico chimiques de l'ail. Mémoire de master.

**Synthèse**

**Bibliographique**

# **Chapitre 1**

## **Généralités sur l'ail**

## 1. Historique

L'ail est une plante forestière comestible très recherchée, cultivée depuis plusieurs milliers d'années. L'ail semble avoir son origine en Asie centrale, où il est cultivé depuis plus de 5000 ans (**Robert et al., 2002**) et s'est ensuite propagée (prolongé) à la Chine, au Proche-Orient, et les régions méditerranéennes avant de passer à l'ouest de l'Europe centrale et méridionale, l'Afrique du Nord (Egypte) et au Mexique (**Ganesh et al., 2014; Sultan et al., 2014**).

L'ail (*Allium sativum* L.) est connu depuis la plus haute antiquité. C'était la «thériaque des paysans», « de Galien » ou « des pauvres » (**Lamendin, 2007**), pour son utilisation par les Babyloniens il y a 4500 années et par les Chinois il y a 2000 ans. Les Babyloniens, les Egyptiens, les Phéniciens, les Vikings, les Chinois, les Grecs, les Romains et les Hindous utilisaient fréquemment l'ail comme un remède pour les troubles intestinaux, les infections respiratoires, les maladies cutanées, les plaies, les symptômes de vieillissement et plusieurs autres affections (**Block, 1985**). Les ouvriers qui édifièrent les pyramides recevaient chaque jour une gousse d'ail. En faisant figurer l'ail en bonne place au menu des bâtisseurs de la pyramide de Guizèh, les Egyptiens du V<sup>ème</sup> millénaire avant J-C, attestaient déjà de ses vertus stimulantes.

Les Hébreux de l'Exode le mettaient au nombre des biens les plus précieux qu'il leur fallut laisser en Egypte (**Lamendin, 2007**).

L'ancien Plin de naturaliste et écrivain latin (23-79 avant J.C); affirme dans son traité d'histoire naturelle : « L'ail a des propriétés puissants. C'est un antidote contre les piqûres des musaraignes, les morsures de chiens et de serpents et neutralise les effets de certaines plante vénéneuses ». Il le recommande pour le traitement de l'asthme, la suppression de la toux et les parasites intestinaux (**Medjeldi, 2012**).

Louis Pasteur était le premier à démontrer que l'ail pouvait détruire des bactéries. En 1858, il a noté une activité antibactérienne de l'ail et il a été utilisé comme un antiseptique pour éviter la gangrène pendant les deux guerres mondiales I et II.

En 1916, le gouvernement anglais demandait à sa population de lui fournir de grandes quantités d'ail pour répondre aux besoins médicaux de son armée en guerre. Durant la 2<sup>ème</sup> guerre mondiale, il surnommé la « pénicilline des Russes » car l'armée russe ut recours à l'ail lorsqu'elle vint à manquer de la pénicilline (**Schlienger, 2007; Medjeldi, 2012**).

Actuellement, l'ail est cultivé à l'échelle mondiale et la Chine est connue pour être le plus grand producteur d'ail (**Medjeldi, 2012**).

## 2. Présentation

### 2.1. Etymologie

Allium vient du celtique all, qui se désigne comme une saveur brûlante, âcre en raison de sa saveur piquante et sativum signifie cultiver, planter du latin serere et de orum, les moissons, les récoltes, les semences (**Ghesquiere, 2016**).

Allium sativum désigne le nom de l'ail cultivé en latin. Il peut se retrouver sous le nom d'ail commun, d'ail blanc, d'ail cultivé, comme étant la thériaque des pauvres, puisqu'ils buvaient le jus d'ail pour chasser le venin lors de morsures de serpent ou encore l'ail de printemps. En anglais, l'ail se traduit sous le nom de garlic (**Goetz et Ghédira, 2012**).

Latin botanique: *Allium sativum* L.; Français: Ail, la rose des plantes et dans d'autres langues: Allemand: knoblauch • Espagnol: ajo • Portugais: alho • Italien: aglio • Arabe: thum • Russe: chesnok • Japonnais: nin'niku (**Guemouni, 2016**).

### 2.2. Classification botanique

Il appartient à l'ordre des Liliales, à la famille des Liliacées et au genre Allium. La famille des Liliacées comprend environ 280 genres et plus de 4000 espèces qui poussent dans le monde entier (**Goetz et Ghédira, 2012**).

**Arthur Cronquist** (1919;1992) est un botaniste américain, qui propose un système qui fait encore référence aujourd'hui. La classification d'Arthur Cronquist de 1981 est une classification « intuitive » basée sur des critères de ressemblances morphologiques, anatomiques et chimiques et réunit dans des groupes communs les végétaux qui présentent entre eux un nombre plus ou moins élevé de ressemblances profondes (Tableau 1) (**Ghesquiere, 2016**).

**Tableau 1:** Classification botanique de l'ail (Classification des Angiospermes selon Cronquist) (**Ghesquiere, 2016**).

Règne	Plantae
Sous règne	Trachéobionta (= Végétaux vasculaires)
Embranchement	Magnoliophyta (= Spermaphytes)
Sous embranchement	Magnoliophytina (= Angiospermes)
Classe	Liliopsida (= Monocotylédones)
Sous classe	Liliidae
Ordre	Liliales
Famille	Liliaceae
Genre	Allium
Espèce	<i>Allium sativum</i> L.

Cependant, la classification d'Arthur Cronquist est remise en question depuis la nouvelle classification par APG, en 1998. Cette nouvelle classification APG est fondée sur les caractères moléculaires des végétaux et non sur les ressemblances au niveau de certains caractères végétatifs, permettant l'étude de la formation et de l'évolution des organismes vivants en vue d'établir leur parenté, autrement dit la phylogénie (Dupont et Guinard, 2007).

En effet, l'APG (Groupe des angiospermes phylogéniques) est défini par une ressemblance qui se porte sur les séquences d'acides aminés, de protéines ayant les mêmes fonctions. La comparaison des séquences homologues donne une idée de la divergence entre les espèces. Concernant *Allium sativum*, la classification APG II est définie ci-dessous:

Angiospermes → Monocots → Monocotylédones → Liliidées → Liliales

L'espèce *sativum* est divisée en trois sous-espèces:

- *Ophioscorodon*: ail blanc ou commun, résistant au froid;
- *Sativum*: ail rose, très aromatique et excellent pour la conservation, étant les plus répandus.
- Ail de *Lautrec* (remarquables grâce à leur terroir d'origine).

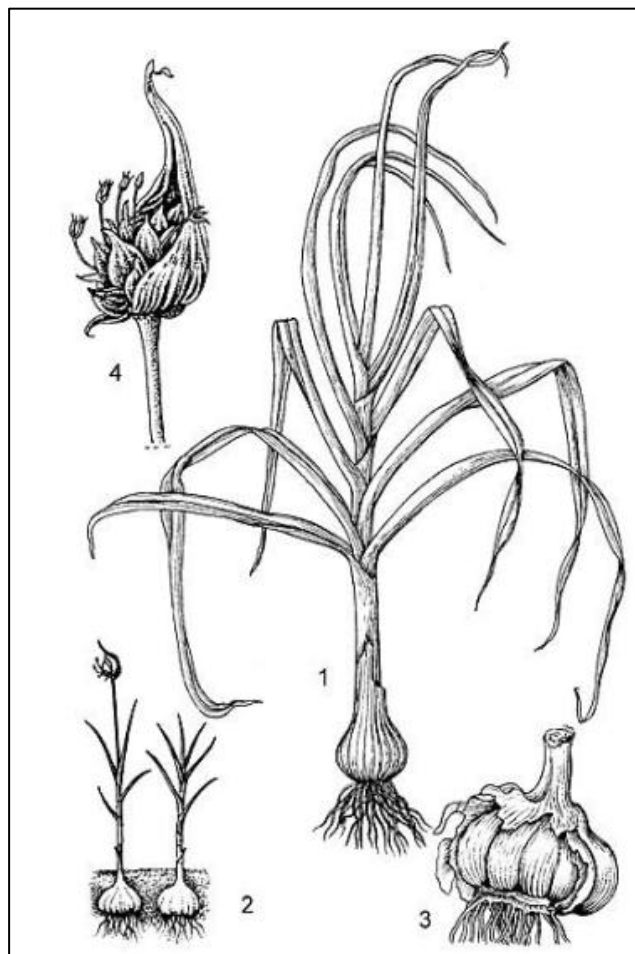
Le genre *Allium* est le plus répandu, avec 600-900 espèces. Il existe différentes variétés de l'ail, *Allium sativum* qui se diffère par la taille, la forme du bulbe, ou encore par la couleur de l'enveloppe (Goetz et Ghédira, 2012).

### 2.3. Description botanique

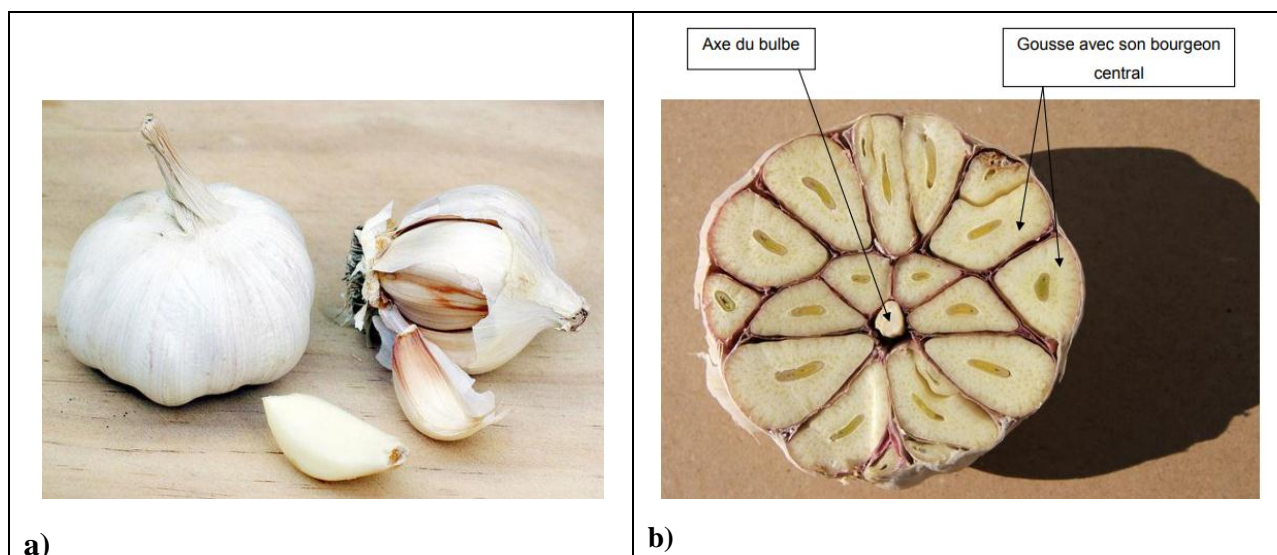
L'ail est une plante herbacée, bulbeuse, vivace qui peut atteindre jusqu'à 90 cm de hauteur. C'est une espèce à feuilles linéaires engainantes, à ombelles globuleuses de fleurs blanches ou rougeâtres entourées d'une longue spathe caduque terminée en pointe; à bulbe formé de caïeux (les gousses) insérés sur un plateau apâli, entourés d'une tunique commune blanchâtre. Il est apprécié dans le domaine culinaire pour leur goût et leur odeur caractéristiques. L'odeur faible, se développe forte et soufrée dès que les tissus sont lésés (Figure 2 et 3) (Schlienger, 2007; Bruneton, 2009; Syafiqah, 2012).

- ✓ **Tige:** Elle est creuse et peut atteindre 50 cm de hauteur. Elle porte jusqu'au tiers de sa hauteur des feuilles. Elle se termine par des fleurs.
- ✓ **Feuilles:** Elles sont linéaires, alternées et à nervations parallèles, le plus souvent engainantes les unes aux autres, planes et lisses, entières ou cylindriques qui entourent la tige jusqu'au sommet (Medina et Gracia, 2007).

- ✓ **Fleurs:** A base tubulaire, forment des clochettes, des étoiles ou des coupes, en ombelles généralement sphériques, parfois hémisphériques, ovoïdes, ou pendantes (**Medina et Gracia, 2007**). Les fleurs sont variables en nombre et parfois absentes. Elles peuvent se défraîchir dans le bourgeon. Elles sont installées au bout de pédicelles minces et se composent d'un périanthe de six pièces d'environ 4-6 mm de long, rosâtre ou blanche et d'un ovaire supère triloculaire (**Berenice, 2010**). Elles sont aussi composées de 3 sépales et de 3 pétales libres persistants, de 6 étamines plus courtes que le périanthe et disposées en 2 verticilles. Les filets des étamines internes sont dilatés, élargis à 3 pointes égales au sommet, la pointe médiane portant seule l'anthere (**Séverine, 2005**).
- ✓ **Les racines:** Racine à bulbe composé de trois à 20 bulbillons arqués (les caïeux) (**Medina et Gracia, 2007**).
- ✓ **Le fruit:** Le composant du bulbe est le caïeu ou « gousse », entre 10 et 15 caïeux composent un bulbe selon le type de variété de l'ail. Les caïeux sont compactés les uns aux autres et sont enveloppés d'une tunique membraneuse 22 blanchâtre ou rosée. La multiplication végétative se fait à partir des caïeux qui assurent la survie de l'espèce (**Berenice, 2010**).



**Figure 1:** Schéma général d'*Allium sativum*: 1 et 2: Port de la plante, 3: bulbe, 4: florescence (**COLIN, 2016**).



**Figure 2:** Schéma de bulbe d'*Allium sativum*; **a)** Bulbe d'*Allium sativum* et ses caïeux, **b)** Coupe d'un bulbe d'Ail cultivé (COLIN, 2016).

### 3. Composition Biochimique de l'ail

La composition de l'ail est complexe, avec plus de 200 composés différents qui contribuent à ses effets. La caractéristique la plus importante et unique de l'ail est sa teneur élevée en substances organiques soufrés. L'ail contient au moins quatre fois plus de soufre que les autres légumes à haute teneur en soufre tel que l'oignon, le brocoli et le chou-fleur (Carmia, 2010).

La gousse d'ail contient d'eau (65%), des polysaccharides (28% principalement des fructanes), des protéines (2%) (Allinase; dont essentiellement des enzymes (peroxydase)), 1,2% des acides aminé libre (arginine); et 1.5% de fibre, et des nombreux composés organo-soufré (2,3%) responsables de l'odeur et du goût caractéristique de l'ail (Figure 4) (Macpherson et al., 2005).

L'ail est une excellente source de manganèse. Il est aussi une très bonne source de vitamine B6 et la vitamine C. En outre, l'ail est riche en minéraux tel que phosphore, le calcium, le potassium, et le cuivre (tableau 2) (Nur syafiqah, 2012).

La substance active allicine (diallyl thiosulfate) est responsable de l'odeur âcre typique et de ses propriétés thérapeutiques (Macpherson et al., 2005). Les composés contenant du soufre principaux présents dans l'ail sont sulfoxydes gamma-glutamyl-S-allyl-cystéine et la S-allyl-Lcystiéne (allicine) (Santhosha et al., 2003).

L'ail contient des huiles essentielles (chères à l'herboristerie et à l'aromathérapie), l'alliine et l'allicine qui sont des antioxydantes. L'allicine présente dans l'ail frais est formée à partir de l'aliine dans les extraits secs grâce à une enzyme, l'allinase, dont l'activité est inhibée par le suc gastrique et aussi désactivée par la cuisson de l'ail (Schlienger, 2007).



Tableau 2: Valeur nutritionnelle de l'ail frais (Suleria et al., 2015).

Nutriments	Quantité par 100g/m.h
Energie	134 kcal
Eau	65 %
Protéines	6 - 7 g
Glucides	24 - 27 g
Fibres	1 g
Lipides	0,1 mg
Sodium	19 mg
Phosphore	134 mg
Calcium	38 mg
Vit C	14 mg
Vit E	0,01 mg
Vit B1	0,2 mg
Fer	1,4 mg

#### 4. Classification des variétés d'ail

Il est d'usage de classer l'ail, selon la couleur des téguments, en ail rose et ail blanc. Mais le critère de couleur informe moins que celui de l'intensité de dormance naturelle, dont dépendent l'époque de plantation et l'aptitude à la conservation.

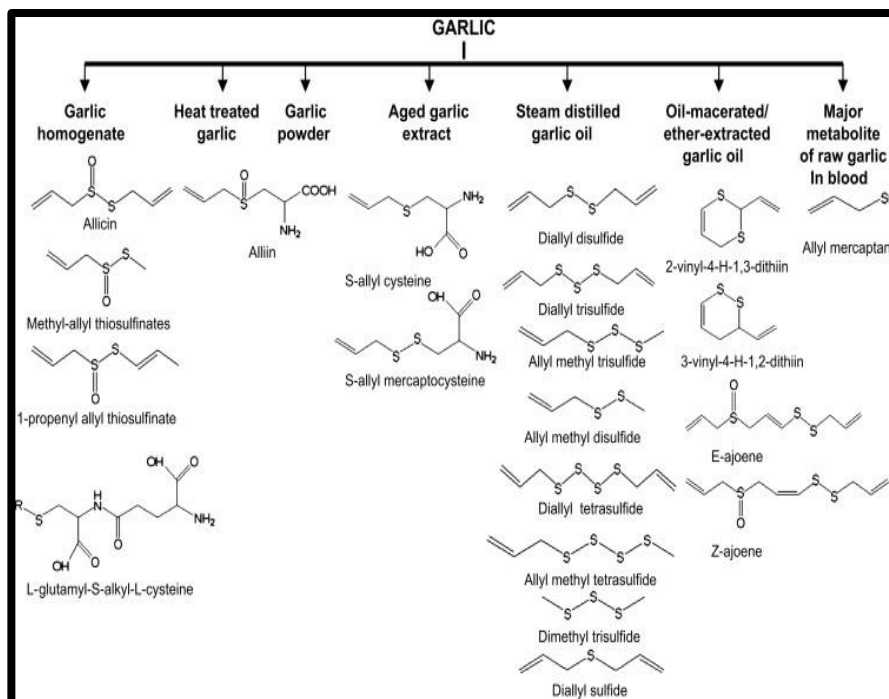


Figure 3: Principaux composés organo-soufrés présents dans différents dérivés d'ail (Marta et al., 2007).

Les critères de classification sont:

- Couleur de la tunique externe: Blanche; Striée de violet (*Violet de Cadours*) et Jaune cuivrée.
- Couleur de caïeux: Rougeâtre; Mauve (*Violet de Cadours*) et Rosé (**Medjoudj, 2012**).

Tant que tous les ails produits sont le résultat de la multiplication par voie végétative des gousses ou des bulbilles. La classification traditionnelle distingue les cultivars selon des critères morpho-physiologiques en fonction de leur période de végétation et de la tunique du bulbe et des bulbilles. Il y a l'ail d'Automne, l'ail de printemps et l'ail alternatif (**Bakhoche, 2005; Stavělíkoá, 2008**).

❖ **L'ail d'automne:** Il est planté de septembre à novembre, c'est de l'ail blanc ou violet qui est souvent plus précoce mais supporte moins le froid (**Ghesquiere, 2017**). Il produit très rarement des hampes florales (**Argouarch, 2005**). La récolte s'étale sur deux mois: de mi-avril à mi-juin pour la récolte en frais; et de mi-mai à mi-juillet pour la récolte en sec. Il se conserve jusqu'à décembre-janvier.

- a. *Ail blanc de la Drôme*: variété à dormance réduite, à bulbe bien blanc et à caïeux variant du blanc jaunâtre au violet mauve pâle.
- b. *Ail blanc de Lomagne*: variété proche de l'ail de la Drôme, mais un peu moins productive par contre sa résistance à la mosaïque de l'ail est bonne.
- c. *Ail violet de Kadours*: variété un peu plus hâtive que les précédentes et assurant de bon rendement, bonne tolérance à la mosaïque.
- d. *Ail Rougeâtre de Vendée*: variété d'automne la plus hâtive cultivée pour la vente de l'ail en vert et aussi pour l'industrie de déshydratation (**Laumounier, 1979**).

❖ **L'ail de printemps:** Il est planté entre décembre et janvier selon les variétés et le climat et parfois même jusqu'en mars. Lui aussi ne produit que très rarement des hampes florales. C'est de l'ail rose qui se récolte presque toujours en sec en juillet. Il se conserve jusqu'en mars-avril de l'année suivante (**Stavělíkoá, 2008**).

- a. *Ail rose d'auvergne*: Il s'agit là d'une variété dont la dormance prononce en fait une variété alternative.
- b. *Ail rose de Lautrec*: Variété également alternatives produisant une hampe florale qu'il convient d'ailleurs de couper lorsqu'elle se présente afin de faciliter le grossissement du bulbe. Sa conservation est bonne, de même que sa résistance à la mosaïque (**Laumounier, 1979**).

❖ **L'ail à bâtons:** Il est dit alternatif car pouvant être planté de novembre à février. Il produit couramment des hampes florales. Ce sont des ails roses récoltés généralement en sec de la mi-juin à la mi-juillet (**Stavělíkoá, 2008**).



**Figure 4:** Cultivars d'ail: a) Blanc, b) Violet, c) Rose, d) Pourpre (Lisciani et al., 2017).

#### ○ Variétés les plus cultivées en Algérie

- Rouge local, Rouge de Béchar, Rose de Kabylie, Violet de Kadours.

Sous l'appellation d'Allium, sont rassemblées l'espèce cultivée (*Allium sativum* L.) et plusieurs espèces sauvages :

- L'ail des ours, espèce forestière aux feuilles et fleurs en étoiles très odorantes (*Allium ursinum*).
- L'ail rose aux fleurs roses et à saveur plus sucrée (*Allium roseum*).
- L'ail d'Espagne d'Amérique (*Allium canadense*).
- L'ail sauvage d'Europe (*Allium oleraceum*).
- L'ail des vignes (*Allium vineale*) (Syafiqah, 2012).

## 5. Propriétés de l'ail

L'ail est l'une des plantes médicinales les plus étudiées. Depuis 1960; plus de trois milliers de documents de recherche ont été publiés sur la chimie et les effets biologiques de l'ail et ses préparatifs (Vinay et Dinech, 2008).

L'ail et ses dérivés ont montré des activités biologiques variées, y compris des activités antidiabétiques, anti athérosclérose, anti carcinogénèse, actions anti thrombotiques, propriétés antiseptique et bactéricide. Cependant, ces activités biologiques sont bien célèbres, seules certaines complications, comme les maladies cardiovasculaires et antidiabétique (Thomson et al., 2000; Suleria et al., 2015).

L'ail présente d'importantes propriétés au niveau vasculaire, agissant dans la protection des artères et des veines. L'ail exerce également une activité hypotensive par vasodilatation des

vaisseaux sanguins. Il est utilisé dans les troubles de la circulation sanguine en cas d'hypertension légère ou de cholestérol sanguin élevé (**Bhandari, 2012**).

L'ail est aussi utilisé dans les bronchites chroniques en favorisant les sécrétions, la coqueluche, asthme, faiblesse générale, fatigue physique et intellectuelle, arthritisme. Il a été considéré comme un préservatif contre les maladies infectieuses : choléra, typhus, tyroïdes, diphtérie...etc. (**Suleria et al., 2015**). Ainsi, il exerce également une action préventive anticancéreuse en désinfectant l'intestin en accroissant la sécrétion gastrique et biliaire. Il le recommande également contre les atteintes causées par la nicotine aux vaisseaux, contre les troubles cardiaques et digestifs issus du tabagisme (**Beloued, 1998**).

L'ail inhibe certaines enzymes impliquées dans la synthèse lipidique, diminue l'agrégation plaquettaire, prévient la peroxydation des LDL et améliore le statut antioxydant. (**Schlienger, 2007**).

L'ail est d'abord utilisé en cuisine pour relever le goût des aliments. Aujourd'hui, les bulbes sont utilisés frais mais aussi séchés, en granules ou en poudre comme condiment. La poudre d'ail est très utilisée pour aromatiser les aliments (**Li et al., 2007**).

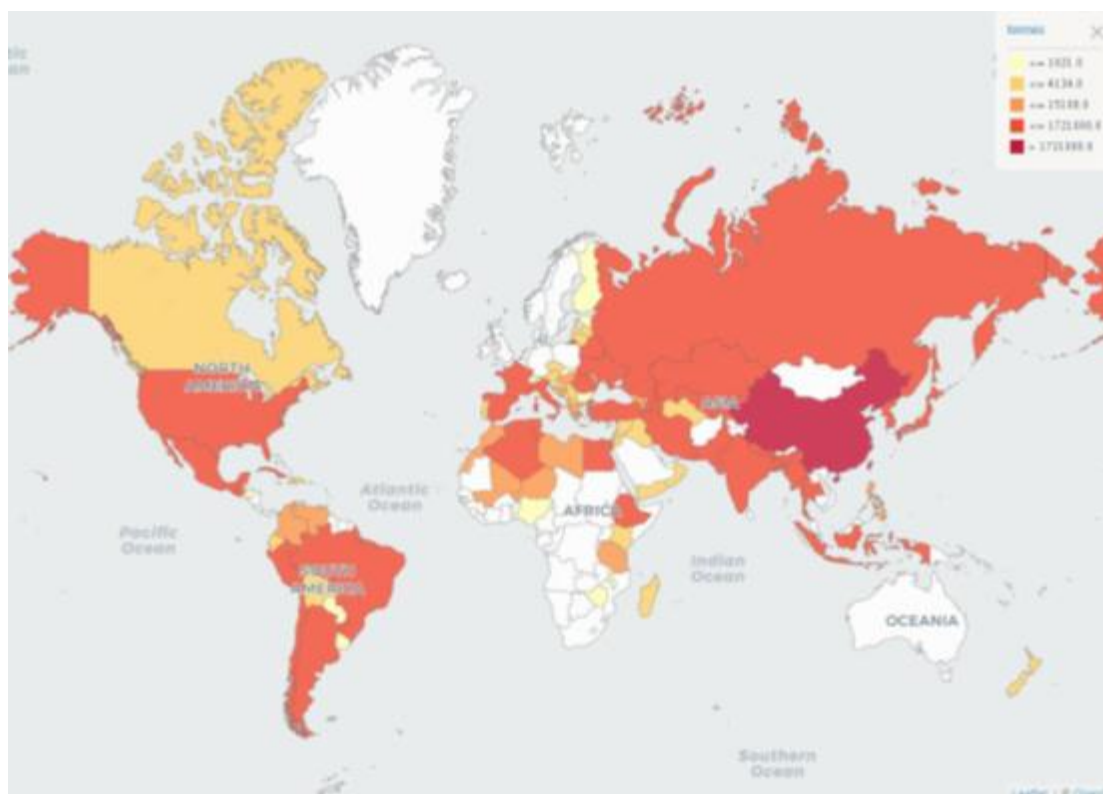
Selon la filière des plantes médicinales biologiques du Québec (2010), l'ail est utilisé au jardin comme fongicide, insecticide et répulsif général. Il peut être associé au chou, à l'aubergine et à la tomate.

## **6. Production géographique d'ail**

### **6.1. Production d'ail dans le monde**

La production d'ail dans le monde reste très importante. Dans le genre *Allium*, la consommation d'ail se trouve deuxième position après l'oignon.

La production d'ail est très élevée concernant l'Asie. Ce continent arrive en première place avec 22 millions de tonnes d'ail en 2016. Suivi par l'Europe, l'Amérique, l'Afrique et pour finir par l'Océanie (**Vibert et Vernin, 2016**).



**Figure 5:** Répartition mondiale de la culture d'ail en 2018 selon l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture.

## 6.2. Production de l'ail en Algérie

D'après les données de FAOSTAT ([faostat3.fao.org](http://faostat3.fao.org)), la production d'ail en Algérie reste très faible contrairement à la production et à la consommation d'autres légumes. Cela peut s'expliquer par le fait que la consommation d'ail n'est pas identique à celle d'autres légumes comme les haricots et les tomates.

D'après la FAO (2016), l'évolution des superficies, des productions et des rendements en Algérie depuis l'année 2009 jusqu'à 2016 sont présentés dans le tableau 3.

**Tableau 3:** Production de l'ail en Algérie (2009-2016) (FAO, 2016).

Année	Superficie cultivée (Ha)	Production (Qx)	Rendement (Qx/Ha)
2009	8930	356050	39,87
2010	8790	334280	38,03
2011	8960	360630	40,25
2012	9600	420040	43,75
2013	10444	523200	50,10
2014	10848	464360	42,81
2015	11433	535200	46,81
2016	11976	539810	56,80

**Tableau 4:** Superficie des cultures de l'ail des hauts plateaux d'Est.

<b>Wilaya</b>	<b>Superficie (ha)</b>
<b>Batna</b>	810
<b>Mila</b>	768
<b>Biskra</b>	805
<b>El oued</b>	500
<b>M'sila</b>	370
<b>Oum el Bouaghi</b>	149
<b>Constantine</b>	250
<b>Sétif</b>	169
<b>Tébessa</b>	120

# **Chapitre 2**

## **Prétraitements**

- **Champ électrique pulsé**
- **Déshydratation osmotique**
- **Ultrason**

Les technologies classiques de conservation des aliments reposent principalement sur l'utilisation d'élimination de la chaleur (par exemple, congélation), ajout de chaleur (par exemple, mise en conserve) ou additifs chimiques (par exemple, chlore) pour assurer la sécurité et la durée de conservation des produits alimentaires en inactivant des agents pathogènes ou des dommages. Microorganismes et enzymes.

En raison de divers facteurs, notamment la demande des consommateurs pour des produits alimentaires sans produits chimiques avec une qualité nutritionnelle améliorée, une alternative aux techniques de conservation classiques communément appelées «technologies non thermiques» est apparue. Les technologies non thermiques, utilisées comme prétraitement, sont très attractives pour offrir des produits de qualité supérieure. Ces technologies peuvent potentiellement garantir la sécurité alimentaire à des températures ambiantes avec un impact négatif minimal ou nul sur la qualité et le profil nutritionnel des aliments. Une gamme de techniques de traitement non thermiques, telles que le champ électrique pulsé, la déshydratation osmotique et le traitement par ultrasons ont été étudiées pour les applications alimentaires (**Knorr et al., 2011; Ros Polski, 2015**).

## **I. Champ électrique pulsé (CEP)**

### **1. Historique**

L'utilisation de l'électricité dans les traitements des produits alimentaires a été débutée dans les années de XXe siècle. En 1920 était la première application du procédé Electro-pure qui fut brièvement industrialisé pour la stérilisation du lait aux Etats Unis (**Castro et al., 1993**).

Dans les années 1940, les champs électriques pulsés (CEP) ont été utilisés par Flaumenbaum pour augmenter la perméabilité de fruits pour faciliter l'extraction ultérieure de jus (**Heinz et Knorr, 2001**).

En 1958, le premier article décrivant le claquage réversible des membranes est publié. C'est le début des études portant sur les effets des impulsions électriques intenses sur les cellules et les tissus biologiques (**Semmak, 2018**).

Au début des années 1960, l'application de CEP pour perméabiliser des cellules dans les produits alimentaires a été brevetée par Doevenspeck et Gewinnung (**Ben Ammar, 2011; Semmak, 2018**).

Dans le domaine du génie génétique, un procédé a été développé par **Zimmermann et al., (1974)**; pour augmenter la perméabilité dans des zones localisées de la membrane, qui est actuellement connu sous le claquage électrique réversible, électro-perméabilisation ou électroporation (**Kambiz, 2008**).

À la fin des années 1980, beaucoup de chercheurs ont continué à développer l'application de CEP pour la conservation des aliments et plusieurs brevets ont été déposés.



Cette technologie a été industrialisée pour la première fois aux États-Unis par les laboratoires Maxwell en 1993. Plus récemment, les CEPs ont été appliqués à l'échelle industrielle entre 2001 et 2005 en Allemagne sur des raisins pour l'amélioration de la couleur et de la teneur en polyphénols (**Ben Ammar, 2011**). En 2005, Genesis jus Cooperative a été la première entreprise au monde à adopter commercialement la technologie de traitement CEP pour la pasteurisation à froid de jus de fruits (**Clark, 2006**).

## **2. Définition**

La technique de CEP est une technologie non-thermique de conservation des aliments qui est étudiée afin d'éviter les conséquences négatives que la chaleur produit sur les aliments (**Puig et al., 2007**). Elle peut garantir une bonne qualité des produits et une bonne efficacité énergétique (**Yang et al., 2016**). Le CEP peut être appliqué efficacement dans de nombreuses applications de transformation des aliments telles que l'inactivation de micro-organismes/enzymes, la récupération de composés bioactifs, la déshydratation et la congélation, etc... (**Arshad et al., 2020**).

Ce traitement consiste à appliquer une haute tension sous forme de courtes impulsions électriques à un produit placé entre deux électrodes. La valeur de l'intensité du champ électrique dépend essentiellement de la nature des cellules (animale, végétale, microbienne) et de l'application envisagée. La tension induite par le champ électrique entraîne la création de pores; ce phénomène est appelé électroporation (**Qamar et al., 2017; Semmak, 2018**).

Le traitement des aliments par champ électrique pulsé permet de produire des aliments d'excellente qualité sensorielle et nutritionnelle, ainsi qu'une longue durée de conservation (**Lelieveld et al., 2007; Qamar et al., 2017**).

### *a) Principe*

La technologie CEP implique l'utilisation des impulsions générant des champs électriques élevés pendant quelques micros à quelques millisecondes, avec une intensité très forte de 5 à 80 kV/cm de manière répétée (pulsé). Le processus dépend du nombre d'impulsions délivrées au produit qui est maintenu entre deux électrodes. Ces électrodes ont un espace spécifique entre elles appelé espace de traitement de la chambre (**Qamar et al., 2017**). Lorsqu'un champ électrique est appliqué, le courant électrique passe dans la nourriture et transféré à chaque point en raison des molécules chargées présentes (**Maged et Ayman, 2012**). Le champ électrique est appliqué sous différentes formes d'impulsions, telles que des ondes à décroissance exponentielle, des ondes bipolaires ou des impulsions oscillatoires (**Qamar et al., 2017**).

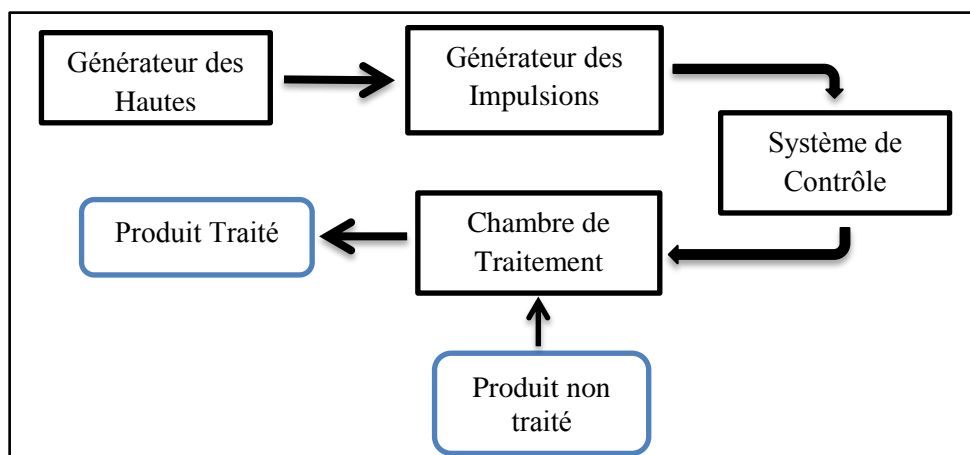
Ce phénomène provoque la perméabilisation de la membrane cellulaire, c'est-à-dire une augmentation de sa perméabilité et si l'intensité du traitement est suffisamment élevée, la désintégration de la membrane cellulaire se produit (**Zelmat, 2017**).

Le processus peut également être exécuté dans différentes plages de température telles que les températures ambiante, inférieure et supérieure à la température ambiante. Les aliments sont emballés après le traitement au CEP, puis stockés au réfrigérateur (Qamar et al., 2017).

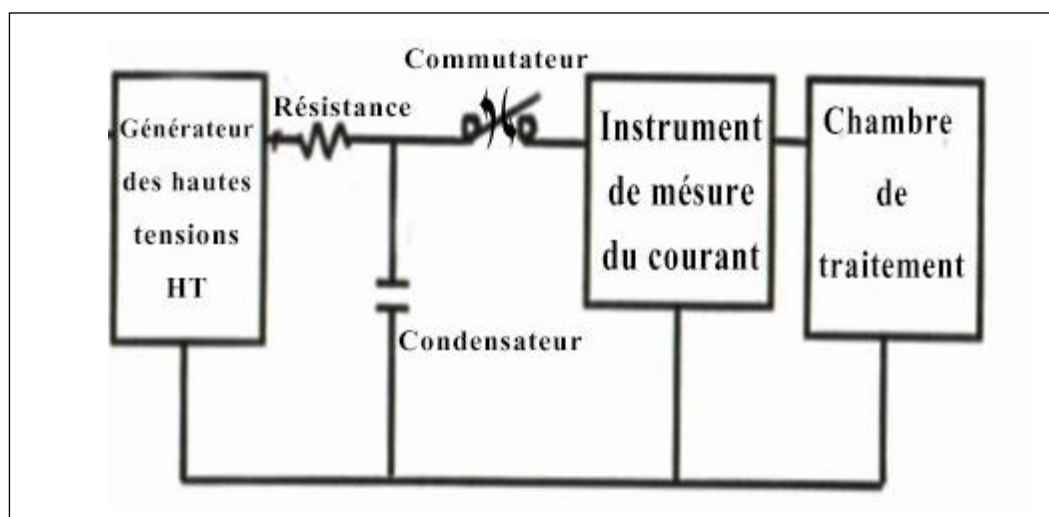
### 3. Système de traitement par CEP

Le principe de génération des impulsions électriques repose sur le stockage de l'énergie électrique dans un condensateur et sur sa restitution à une charge en un temps très bref. Cette opération est réalisée grâce à un commutateur de puissance (Semmak, 2018).

La configuration du système est en fonction des propriétés d'aliment, de mode de traitement, de la chambre de traitement et du système de commutateur (Shamsi, 2008).



**Figure 6:** Schéma d'un système du CEP pour le traitement des aliments (Semmak, 2018).



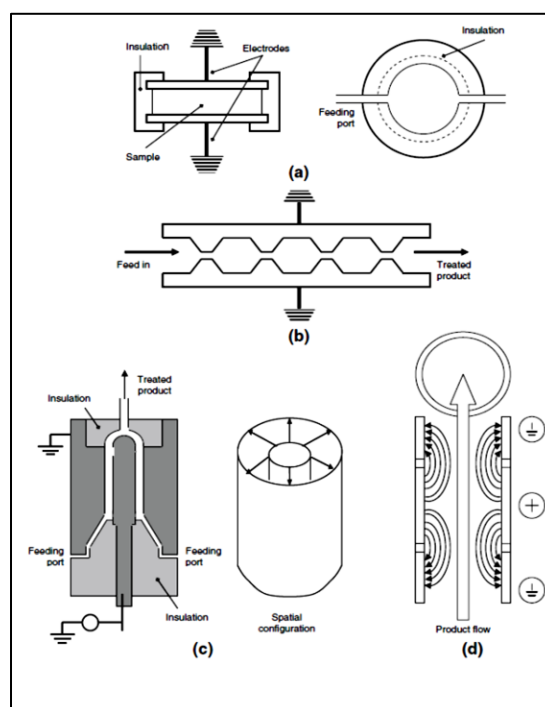
**Figure 7:** Schéma électrique du système de CEP (Shamsi, 2008).

**3.1. Générateur d'impulsions à haute tension:** Il est l'un des éléments indispensables pour le système de champ électrique pulsé. Il transforme le courant alternatif d'alimentation en courant continu par le biais des diodes puis ce courant continu sera développé en courant de haute tension par un circuit électrique compliqué dans ce générateur (Maged et Ayman, 2012).

Le générateur d'impulsions à haute tension fournit des impulsions électriques de la tension, de la forme et de la durée souhaitées en utilisant un réseau de formation d'impulsions plus ou moins complexe (Maged et Ayman, 2012).

**3.2. Chambre de traitement:** C'est l'unité où l'aliment est traité. Elle se compose d'au moins deux électrodes. L'une des électrodes est reliée au générateur et l'autre est reliée à la terre. Ces électrodes sont fabriquées généralement en acier inoxydable et elles sont séparées par un isolant électrique (Semmak, 2018). Les électrodes, la forme et la construction de la chambre de traitement dépendent du type de matériau qui va être traité (Zelmat, 2017).

Il existe plusieurs types de chambre de traitement selon le mode de traitement (statique ou en continu) et la configuration géométrique des électrodes (parallèles plates, coaxial) (Barbosa-Cánovas et al., 1999). Les chambres de traitement statiques présentent beaucoup d'avantages pour les opérations d'extraction appliquées sur les aliments solides et pour l'utilisation à l'échelle de laboratoire. D'une autre part les chambres de traitement continu sont très favorables pour le traitement des aliments fluides et elles peuvent être facilement intégrées dans les procès industriels.



**Figure 8:** Schémas des chambres de traitement aux électrodes parallèles  
 a) une chambre statique, b) vue latérale d'une conception de base continue, c) chambre coaxiale et d) chambre colinéaire (Maged et Aymen, 2012).

**3.3. Condensateurs:** C'est l'unité de stockage de l'énergie. Elle doit être opérationnelle aux hautes tensions et fournit l'énergie nécessaire au traitement. La durée de la pulsation est très courte par rapport à l'intervalle de temps entre deux pulsation ce qu'implique l'utilisation des condensateurs qui se recharge lentement et se décharge rapidement (**Barbosa-Canovas et al., 1999**).

**3.4. Commutateur:** Il est un constituant majeur qui détermine l'efficacité de circuit de CEP. Il commande le stockage et le déchargement électrique, sont utilisé pour décharger instantanément l'énergie stockée dans le condensateur (**Ouya, 2003**).

Il existe plusieurs types de commutateur: les commutateurs à gaz, les commutateurs magnétiques, les commutateurs à diélectrique liquide, les commutateurs à diélectrique solide, les commutateurs à semi-conducteurs, les commutateurs à plasma, les conducteurs explosés électriquement, les thyratrons à injection (**Ouya, 2003**).

## 4. Comportement des aliments dans un champ électrique pulsé

### 4.1. Effet du CEP sur la membrane (mécanismes d'action de l'électroporation)

Le mécanisme de formation de pore induite par le champ électrique pulsé dans la membrane cellulaire n'est pas encore complètement élucidé. L'une des théories les plus acceptées sur la perméabilisation de la membrane cellulaire causée par un champ électrique externe est liée à l'électrocompression de la membrane cellulaire (Figure 14). Le modèle électromécanique développé par **Zimmermann et al., (1974)**; considèrent la membrane cellulaire comme un condensateur séparant les espèces ioniques et les charges libres des côtés interne et externe de la membrane.

Les différentes charges sur les deux côtés de la membrane provoquent un potentiel transmembranaire naturel dans la cellule. Lorsque le matériau cellulaire biologique est soumis à un champ électrique, il se produit une accumulation et une attraction des ions chargés de manière opposée sur les deux sites de la membrane cellulaire non conductrice. Ces réactions entraînent la réduction de l'épaisseur de la membrane. Suite à l'augmentation du champ électrique et à la valeur critique de 1V, la compression membranaire s'intensifie, entraînant la formation de pores temporaires ou permanents et la perte de semi-perméabilité de la membrane (**Anna, 2011; Ben Ammar, 2011**).

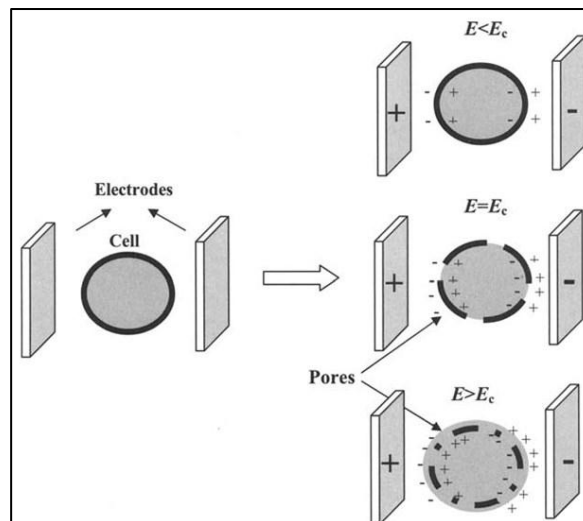
Ainsi, une augmentation de la température pourrait entraîner des modifications de la structure de la membrane et affecter sa fonction de barrière. De plus, la perméabilisation des membranes pourrait être une conséquence des canaux protéiques dénaturés dans la couche lipidique, car leur fonctionnalité dépend du potentiel transmembranaire naturel. En raison du courant de joule élevé ou de la modification électrique des canaux protéiques avec dénaturation ultérieure, l'identification

de l'électroporation peut avoir lieu dans le canal protéique ainsi que dans la fraction lipidique de la membrane (Anna, 2011).

Peu d'informations existent sur la durée entre le passage de la réversibilité à l'irréversibilité des pores au cours ou après traitement par champs électriques (Ben Ammar, 2011).

#### 4.2. Effets du CEP sur les constituants alimentaires

Des molécules chargées comme les protéines, les polysaccharides, certains lipides ou des molécules porteuses des liaisons éthyléniques pourraient subir des modifications chimiques, sous l'effet de champs électriques. Grahl et Markl, (1996); rapportent que les champs électriques pulsés n'ont qu'un effet très faible voire négligeable, sur les protéines et les vitamines. CASTRO (1994); rapporte qu'un traitement de 70 impulsions à 18,8 kV/cm, diminue l'activité enzymatique de la phosphatase alcaline du lait de 60 %.



**Figure 9:** Schéma explicatif de l'effet du CEP sur la membrane cellulaire (Da-Wen, 2014).

Le prétraitement par CEP permet une amélioration de l'extractabilité des composés phénoliques à partir des coproduits viticoles, comparativement à une diffusion sans prétraitement préalable (Silene, 2015).

Beaucoup d'études ont prouvé que le CEP conserve le pH, l'acidité, °Brix, la viscosité, la conductivité, la vitamine C, les composés volatiles, les composés phénoliques et plusieurs autres composés organiques de produit après traitement (Rivas et al., 2006; Cserhalmi et al., 2006; Aguilar-Rosas et al., 2007).

### 4.3. Effet du CEP sur les qualités organoleptiques des aliments

Le CEP a gagné une place dans le traitement des aliments car il ne présente pas les effets négatifs de traitement thermique (Knorr et al., 2011). Il inactive les enzymes et les microorganismes tout en gardant les propriétés organoleptiques de produit frais et sans perte significative des nutriments (Sobrino-Lopez et Martin-Belloso, 2010; Odriozola- Serrano et al., 2013). L'étude de Zarate-Rodriguez et al., (2000); a prouvé que la couleur des jus devient pâle après traitement par CEP.

## 5. Facteurs influençant le traitement par CEP

Il existe plusieurs facteurs qui influent le traitement par le CEP et ils sont de trois types :

- Les caractéristiques de l'aliment dont la conductivité et le pH
- Les caractéristiques biologiques liées aux enzymes et aux microorganismes
- Les Paramètres technique de traitement comme le voltage, la durée de pulsation, le type de pulsation, la capacité de condensateur, le mode de traitement, le débit pour les aliments fluide et la chambre de traitement (Da-Wen, 2014).

**5.1. Intensité de CEP:** L'intensité de champ électrique  $E$  est un paramètre de base de l'efficacité de l'électroperméabilisation des tissus végétaux (Semmak, 2018). 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 (Ben Ammar, 2011).

**5.2. Le type de pulsation:** Selon l'installation électrique utilisée, les impulsions générées peuvent avoir différentes formes (Figure 10). Elles peuvent être soit monopolaires, soit bipolaires. Les impulsions bipolaires assurent une électroporation plus symétrique que les impulsions monopolaires (Silene, 2015). Les impulsions monopolaires sont généralement rectangulaires ou exponentielles, tandis que les impulsions bipolaires sont discontinues rectangulaires, exponentielles décroissantes ou sinusoïdales (Silene, 2015). Les impulsions rectangulaires sont plus efficaces que les impulsions exponentielles du point de vue énergétique (Semmak, 2018).

**5.3. Durée d'impulsion:** Les impulsions milliseconde sont utilisées soit pour perméabiliser la membrane plasmique. Ces impulsions sont aussi appelées impulsions LV (Low voltage). Les impulsions microseconde souvent appelées impulsions HV (high voltage), peuvent être utilisé pour entrainer l'électroperméabilisation. Dans le cas d'impulsions nanosecondes et subnanosecondes, les charges électriques n'ont pas le temps de se déplacer et de modifier le potentiel transmembranaire permettant d'aboutir au processus d'électroporation. Dans ce cas, le

champ électrique se propage ainsi dans le milieu intracellulaire et peut créer un phénomène d'électroporation des membranes du noyau ou des mitochondries (Semmak, 2018).

#### 5.4. Temps de traitement

Le temps de traitement est un paramètre qui influence particulièrement l'efficacité du prétraitement par CEP (Silene, 2015). 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 »). Le temps de traitement  $t_{CEP}$  est alors défini comme suit:

$$t_{CEP} = N \cdot n \cdot t_i \quad (1)$$

Avec «  $N$  » le nombre de trains d'impulsions, «  $n$  » le nombre d'impulsions par train, «  $t_i$  » la durée d'une impulsion (s).

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 (Ben Ammar, 2011).

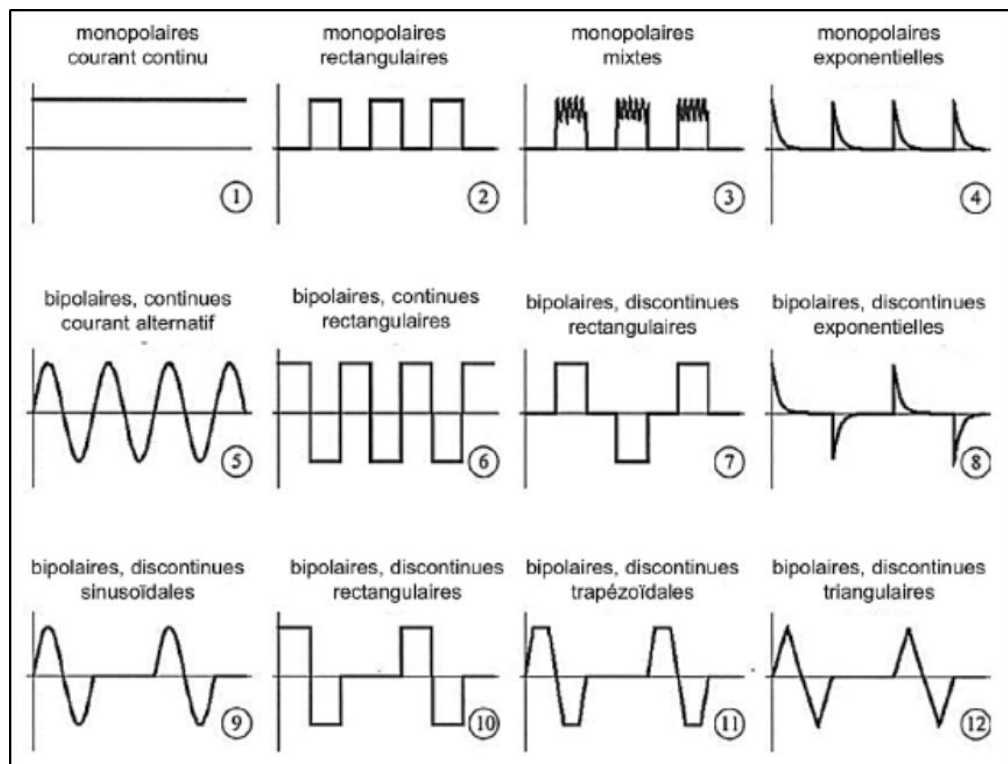


Figure 10: Formes typiques des impulsions (Semmak, 2018).

#### 5.5. Température de traitement

La température a un effet considérable sur 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. La température a aussi un effet sur les propriétés mécaniques du tissu (Ben Ammar, 2011; Semmak, 2018). Une étude de Zimmermann (1974); a montré que la

température agit sur la perméabilisation cellulaire lors d'un traitement par champ électrique (Semmak, 2018). Lebovka et al., (2004<sub>a</sub>); ont montré qu'un préchauffage à 50°C contribue efficacement à l'endommagement des cellules.

### 5.6. Conductivité électrique du milieu

L'efficacité du prétraitement CEP est également fonction de la conductivité du milieu à traiter. Lorsque la différence de conductivité du milieu intracellulaire et extracellulaire est importante alors la diffusion des composés au travers de la membrane électroporée sera plus rapide. La présence d'air entre les particules réduit la conductivité du milieu et peut influencer l'efficacité du traitement électrique (Silene, 2015; Semmak, 2018).

## 6. Détection de la perméabilisation cellulaire

Plusieurs méthodes de détection de la perméabilisation cellulaire ont été rapportées dans la littérature. Le choix de la plus pertinente se fait en fonction des objectifs visés.

- La perméabilisation cellulaire peut être détectée par microscope électronique à balayage ou microscopie optique. Ce dernier est basé sur l'utilisation de plusieurs types de colorants, tels que le bleu de Trypan (TB), l'iodure de propidium (IP) 55 et le rouge neutre (RN). Les cellules sont considérées comme perméabilisées si leur cytoplasme est de couleur bleu dans le cas de TB 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 (Ben Ammar, 2011).
- **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. Un indice de perméabilisation  $Z$ , a été défini comme suit par Rogov et Gorbatov (1974):

$$Z = \frac{\sigma - \sigma_i}{\sigma_d - \sigma_i} \quad (2)$$

Avec «  $\sigma$  » la conductivité électrique ( $S \cdot m^{-1}$ ); «  $\sigma_i$  » la conductivité électrique initiale ( $S \cdot m^{-1}$ ); «  $\sigma_d$  » 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 (Ben Ammar, 2011).



## 7. Applications du champ électrique pulsé

La perméabilisation de la membrane cellulaire est utilisée dans de nombreux domaines tels que la biotechnologie, la biologie cellulaire, la médecine et l'industrie alimentaire (Zelmat, 2017).

Cette technologie peut également être utilisée avec succès pour la désintégration des tissus biologiques, ce qui facilite l'extraction de composés intracellulaires à partir de différents fruits. Par exemple, la pectine est un composant très utile que l'on trouve dans de nombreux fruits et qui est traditionnellement extraite par réaction enzymatique, mais cette réaction produit moins de pectine en raison de son faible rendement (Qamar et al., 2017).

L'application de la technologie des champs électriques pulsés a été démontrée avec succès pour la pasteurisation d'aliments tels que les jus de fruits, le lait, les yaourts, les soupes et les œufs liquides (Maged et Ayman, 2012), l'amélioration des propriétés texturales et sensorielles d'un fromage fabriqué à partir de lait traité au CEP (Anna, 2011). La fraîcheur des arômes, la faisabilité économique, l'amélioration des attributs fonctionnels et texturaux et la durée de conservation prolongée sont quelques-uns des principaux points d'intérêt en plus de la sécurité microbiologique des produits alimentaires (Maged et Ayman, 2012).

En outre, le traitement au CEP offre un potentiel impliquant la décontamination des eaux usées (Anna, 2011), utilisée dans le traitement de la viande à diverses fins, notamment l'amélioration de la perméabilisation cellulaire pour augmenter la tendreté, l'atténuation de la charge microbienne pour améliorer la durée de conservation et le maintien du profil volatile de la viande pendant le stockage (Qamar et al., 2017). Ainsi, le CEP est appliqué comme prétraitement avant le séchage et la congélation à fin de les améliorer.

• **Séchage:** Le traitement par champ électrique pulsé semble être une méthode non-thermique prometteuse qui donne des avantages intéressants pour l'amélioration du séchage des matériaux alimentaires thermiquement sensibles (Zelmat, 2017). La capacité du CEP à augmenter la perméabilisation signifie qu'il peut être utilisé avec succès pour améliorer le transfert de masse et de chaleur afin d'aider au séchage des tissus végétaux. Des études menées sur différents tissus végétaux tels que le tissu de pomme de terre (Angersbach et Knorr, 1997), la noix de coco (Ade-Omowaye et al., 2000), les carottes (Rastogi et al., 1999), la mangue (Tedjo et al., 2002), et des tranches de pomme (Ade-Omowaye et al., 2002; Maged et Ayman, 2012). Adedeji A. et al., (2008); ont réalisé une étude pour évaluer l'effet de différentes méthodes de prétraitement (blanchiment, micro-ondes et champ électrique pulsé) sur le séchage et le comportement de réhydratation du gombo. Ils ont suggéré que le taux de séchage le plus élevé a été obtenu pour les échantillons prétraités par champ électrique pulsé (Zelmat, 2017).

• **Congélation:** La technologie des champs électriques pulsés permet une électroporation contrôlée des membranes cellulaires sans aucune influence sérieuse sur la structure semi-rigide de

la paroi cellulaire. Elle permet une amélioration de l'échange thermique et/ou une meilleure maîtrise du phénomène de cristallisation (**Ben Ammar, 2011**).

## **II. Déshydratation osmotique (DO)**

### **1. Historique**

La déshydratation osmotique (DO) a été utilisée pendant des nombreuses années pour éliminer l'eau à partir des fruits et des légumes frais et d'accroître leur stabilité au stockage.

La déshydratation osmotique est employée industriellement depuis les années 1960. En 1966 la recherche de la déshydratation osmotique des aliments a été très pionnier.

Ces opérations d'élimination d'eau et d'imprégnation en soluté, opérant par effet de différence de concentration, sont regroupées depuis les années soixante sous l'appellation générique de « déshydratation osmotique » (**Raoult-wack, 1994; Rahman et Perera, 1999 et Chandra et Kumari, 2015**).

### **2. Définition**

La déshydratation osmotique est un procédé de réduction de la teneur en eau obtenue par immersion des denrées à traiter (entières ou en morceaux) dans une solution aqueuse concentrée en sel ou en sucre. Cette technologie favorise l'élimination partielle de l'eau dans les aliments (**Shi et Xue, 2009; Tortoe, 2010**).

La déshydratation osmotique est un procédé de traitement préparatoire qui dépend du phénomène de la diffusion de l'humidité de la nourriture.

La déshydratation osmotique est utilisée en tant que prétraitement pour améliorer les propriétés nutritionnelles, sensorielles et fonctionnelles de nourriture. La nourriture, qui a été déshydraté osmotique, peut être traitée ultérieurement par congélation, la lyophilisation, et le séchage (**Bahadur, 2010**).

#### *a. Principe*

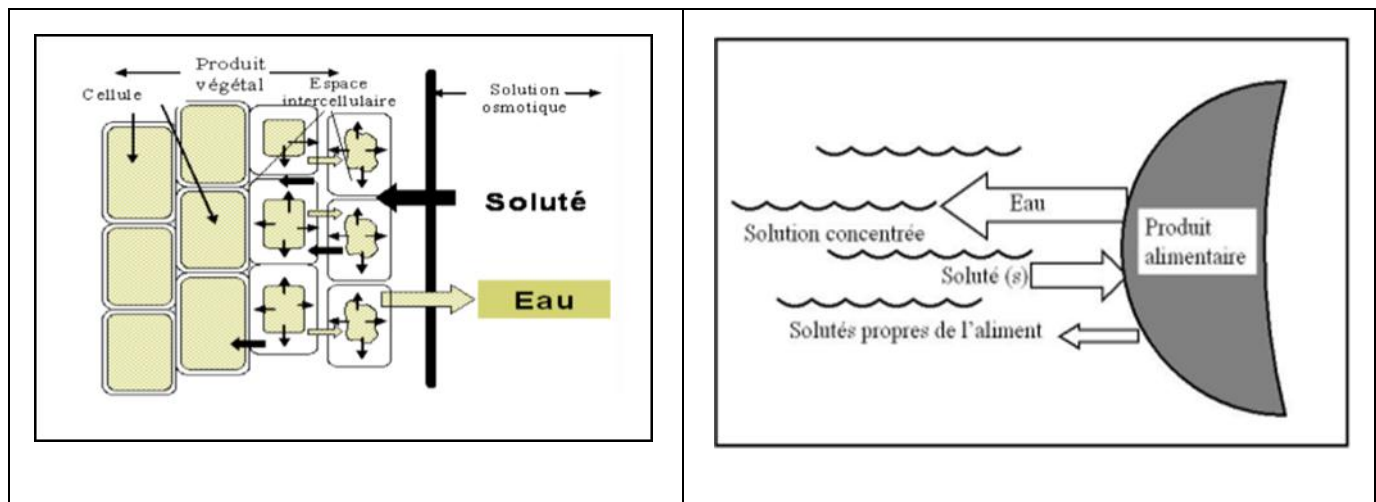
La déshydratation osmotique est basée sur le phénomène d'osmose qui se manifeste à travers des membranes des tissus «semi-perméables» (perméables à l'eau, mais moins aux solutés) (**Anikó Matusek et al., 2003**).

Pendant le processus de la déshydratation osmotique, trois types de transfert de mass dans le flux à contre-courant peut se produit : flux d'eau à partir du produit vers la solution ; transfert du soluté, de la solution vers le soluté de produit, et flux de solutés naturels (organiques, minéraux, sucres, acides et vitamines) à partir du produit vers la solution (**Parak et al., 2002**). Le transfert de mass continue jusqu'à ce que les activités de l'eau de la solution osmotique et l'aliment soient égaux (**Thuan, 2009**). La déshydratation osmotique se fait dans des conditions des températures douces (**Anikó Matusek et al., 2003**).

### 3. Principaux facteurs influençant les performances de la DO

Les cinétiques de transfert d'eau et de solutés dépendent de trois facteurs (**Rastogi et al., 2004; Segovia et al., 2010**):

- ◆ Les propriétés intrinsèques des tissus traités: la structure poreuse, la taille, la forme, la superficie du produit.
- ◆ Les conditions opératoires du traitement: temps, température du traitement, pression, agitation de la solution, composition de la solution.
- ◆ Le mode de mise en contact des phases entre l'aliment et la solution.



**Figure 11:** Représentation schématique du phénomène d'osmose (**Mihoubi, 2012**).

#### 3.1. Propriétés des tissus biologiques

La grande variabilité observée dans le comportement des végétaux au cours d'un traitement de DO est généralement attribuée aux différentes propriétés tissulaires. Ces dernières incluent la compacité des tissus, l'importance relative des espaces intra et extra cellulaires, la porosité et la teneur initiale en matières sèches (**Lenart, 2000**). En effet, la porosité de l'aliment affecte sa texture et influence sa fermeté. Les changements de porosité causés par le processus osmotique favorisent l'action des forces d'entraînement tels que des gradients de pression (**Nieto et al., 2004**).

La majorité des produits végétaux sont découpés en cube ou en sphère avant le traitement de déshydratation osmotique, ce qui facilite le transfert de matière grâce à un contact direct entre les cellules et la solution (**Kowalska et al., 2008**).

#### 3.2. Les conditions opératoires du traitement

##### 3.2.1. Composition de la solution osmotique

La composition des solutions (type, masse moléculaire du soluté) mises en œuvre en DO est un facteur clé du procédé. Les solutions sont préparées à partir de solutés cristallins solubles ou de solvants miscibles à l'eau, utilisés seuls ou en mélange. Les constituants doivent être dépourvus de

toute toxicité, présenter une solubilité suffisante (**Rastogi et al., 2004**). L'utilisation des différents solutés en mélange permet de développer des interactions spécifiques (soluté-soluté et soluté-aliment) pour mieux maîtriser les niveaux de déshydratation et d'imprégnation (**Giraldo et al., 2003**).

Le saccharose est considéré comme l'un des meilleures substances utilisées dans la DO (**Garcia et al., 2007**). Le chlorure de sodium est un excellent agent osmotique, en raison de sa faible masse moléculaire qui se reflète par sa grande mobilité pendant le transfert de masse.

Dans le cas des solutions sucrées-salées, des effets fortement antagonistes sur le gain en soluté ont été identifiés (**Kowalska et al., 2008**).

### *3.2.2. Choix du soluté*

Les caractéristiques physicochimiques, les propriétés fonctionnelles spécifiques (pouvoir aromatique, sucrant, colorant, état de surface collant ou brillant dans l'exemple du glucose) et le pouvoir dépresseur de l'activité en eau de la solution ont compromis entre les exigences technologiques et la qualité du produit final. Toutefois, il est essentiel de prendre en compte le coût de ces solutés, qui peut se révéler prohibitif (**Giraldo et al., 2003**).

### *3.2.3. Concentration de la solution osmotique*

La différence de concentration en soluté entre le produit à traiter et la solution est le moteur du transfert de masse en DO. La perte en eau est plus importante lorsque cet écart est initialement élevé. Pour la déshydratation des fruits, des solutions de sucre concentrées de 50 à 70°B ont été employées (**Corrêa et al., 2010**).

L'usage du sel comme soluté est souvent réservé à la déshydratation des légumes. Il apparaît ainsi nécessaire, industriellement, d'optimiser les conditions de traitement spécifiquement pour chaque produit (**Bchir et al., 2011**).

### *3.2.4. Température de la solution osmotique*

Les transferts d'eau sont favorisés par des températures élevées. Cependant, une température trop élevée n'est pas souhaitable car la température est l'un des facteurs responsables de la rupture des tissus végétaux et des membranes. Pour chaque fruit ou légume il existe une température seuil, au-delà de laquelle la qualité du produit est affectée et les transferts de soluté augmentent par rapport à ceux des transferts de l'eau (**Floury et al., 2008**).

Une température opératoire comprise entre 20 et 40°C est souvent considérée comme optimale sur le plan qualitatif. A ces températures, la semi-perméabilité des membranes cellulaires de différents végétaux est à peine affectée (**Floury et al., 2008**).

### 3.2.5. Durée du traitement

La durée du traitement est un facteur important à considérer, quels que soient les produits traités. Généralement, la perte d'eau, la réduction de masse et le gain en solides augmentent avec le temps de traitement (Rastogi *et al.*, 2004; Kowalska *et al.*, 2008). Mavroudis *et al.*, (2004); ont rapporté un changement de sélectivité au cours de la déshydratation, c'est-à-dire que le rapport de la perte en eau sur le gain en solide (PE/GS) décroît au cours du temps.

### 3.2.6. Agitation sur la DO

Les coefficients de transfert d'eau et le gain en soluté augmentent, non seulement avec la concentration, mais aussi avec l'agitation (Marouze *et al.*, 2001). En effet, Mavroudis *et al.*, (2004); ont mesuré les effets de l'agitation sur le transfert de masse et ont montré qu'une forte agitation augmente la perte en eau au cours du temps. Le gain en solide n'est que peu affectée par le niveau d'agitation, ce qui s'explique par l'existence d'une couche limite diluée autour de l'aliment (Giroux *et al.*, 2000).

### 3.2.7. Rapport solide/solution

Les transferts de matière dépendent fortement de la manière dont sont mises en contact les phases solide (fragile et «légère», l'aliment) et liquide («lourde» et visqueuse, la solution hypertonique). Une viscosité élevée du liquide augmente la résistance externe (à l'interface solide/liquide) aux transferts de matière et nécessite la mise en œuvre d'un système de brassage adapté, compatible avec la fragilité des produits (Adamrounou *et al.*, 2000).

## 4. Méthodes de la déshydratation osmotique

Diverses configurations de mise en contact des phases ont été proposées et étudiées. En pratique, l'opération peut être réalisée en contacteur continu ou discontinu, avec ou sans agitation. Les contacteurs discontinus (batch) sont les plus utilisés. Certains auteurs proposent simplement une immersion forcée des morceaux dans le liquide (Marouze *et al.*, 2001). Cette solution est d'ailleurs utilisée dans la plupart des entreprises de semi-confisage des fruits. D'autres systèmes plus élaborés ont été proposés en vue d'une mise en œuvre du procédé en continu : fluidisation inverse (Raltwack, 1994), brassage mécanique ou brassage mixte hydraulique/mécanique (Giroux et Marouze, 1994).

## 5. Cinétique de la déshydratation osmotique

La force motrice pour la diffusion de l'eau du tissu végétal dans la solution concentrée est fournie par la pression osmotique élevée de la solution (Giovana, 2011). Les cinétiques de transfert de matière dans les produits végétaux peuvent se réaliser en deux phases: une première phase responsable des transferts d'eau et de solutés suivie d'une seconde phase pendant laquelle la perte

en eau est très forte, alors que les débits d'entrée en solutés continuent d'augmenter régulièrement (Kowalska *et al.*, 2008).

Parmi les facteurs qui influencent sur la cinétique de la déshydratation osmotique (Nieto *et al.*, 2008):

Les propriétés des tissus biologiques

- Les conditions opératoires de traitement
- La teneur initiale en matière sèche.

Deux approches sont employées afin d'étudier la cinétique de la déshydratation osmotique :

- L'approche classique qui se base sur la détermination de deux paramètres. Ces paramètres sont la perte d'eau (« Water loss », WL), indiquant l'eau qui sort du matériel cellulaire vers la solution, et le gain en solides (« Solids Gain », SG). Ces paramètres sont habituellement déterminés par la mesure des solides totaux, ou par analyse chimique.
- L'approche fine qui se base sur l'étude des paramètres déterminés à partir de la calorimétrie différentielle à balayage et la résonance magnétique nucléaire (RMN).

Ces techniques permettent d'approcher les liaisons de l'eau dans le produit (Bchir, 2012).

## **6. Applications de la déshydratation osmotique**

La déshydratation osmotique peut être considérée comme un outil pour augmenter la stabilité de produit sans réduire sa valeur nutritive (Barrera *et al.*, 2009). Elle améliore les propriétés nutritionnel, sensorielle et fonctionnel de l'aliment sans changer son intégrité, en dehors de l'élimination partielle de l'eau présente dans l'aliment (Rastogi *et al.*, 2006). Il a été rapporté que le prétraitement osmotique réduit l'activité de l'eau et l'activité enzymatique (polyphénol oxydant) des produits. Donc, il diminue le brunissement enzymatique, avec de légères modifications dans les caractéristiques du produit (Dermesonlougrou *et al.*, 2007).

Après des traitements osmotiques, les produits obtenus sont à humidité intermédiaire et ne sont généralement pas stables à la température ambiante; donc un traitement ultérieur de stabilisation est nécessaire : pasteurisation, appertisation, séchage par entraînement, friture, lyophilisation, refroidissement ou congélation.

### **6.1. Préparation des fruits au sirop**

Une première application de la DO consiste à préparer les fruits au sirop du type «minimally processed foods», proposé pour abricots, pêches, nèfles, kiwis en moitiés, quartiers et aux morceaux. Les produits obtenus ont des caractéristiques de fraîcheur étant donné les dommages thermiques très réduits à cause de l'effet protecteur de sucres sur l'arôme et la couleur (Maltini, 2003).

### 6.2. Déshydro-congélation

La méthode connue depuis longtemps comme «déshydro-congélation» consiste en une déshydratation partielle, suivie par la stabilisation du produit par congélation (Maltini, 2003).

### 6.3. Traitements osmotiques combinés avec séchage

Si l'élimination d'eau par séchage à l'air jusqu'à l'aw désirée du produit; une consistance est trop élevée, l'aw peut être réduite par incorporation de solutés, avant la déshydratation à l'air (Maltini, 2003).

## 7. Intérêt de la déshydratation osmotique

La déshydratation osmotique présente un double intérêt, une économie d'énergie et une amélioration de la qualité du produit (Dixon et Jen, 1977; Lenart, 1996).

En effet, le soluté incorporé peut être un soluté à finalité nutritionnelle, agent de conservation et/ou agent de texture. La DO fournit en plus de la déshydratation conventionnelle, la rétention de la saveur et l'arôme et amélioration de la rétention des composés bioactives (Adamrounou et al., 1994).

Le deuxième intérêt lié à l'application de la technique à l'échelle industrielle est l'économie de l'énergie. Les coefficients d'échange de chaleur et de matière sont généralement bons. De plus, l'eau est enlevée du produit sans changement de phases (Lazaride et al., 1995).

Cette technique est très prometteuse dans la mesure où elle permet de formuler un aliment sans affecter son intégrité.

## III. Ultrason

### 1. Historique

Les ultrasons, avant d'être utilisés par l'Homme, elles furent par la Nature. En effet, les dauphins, les baleines ou encore les chauves-souris produisent des ultrasons afin de se guider et de communiquer au sein de leur environnement naturel (Et-Taouil, 2011). La première utilisation humaine de ces ondes fut celle du sonar développé dès la fin de la première guerre mondiale par Langevin afin de détecter la présence de sous-marins. Pour générer les ultrasons, il mit au point un dispositif à base de lamelles de quartz collées entre deux plaques d'acier. En 1927, Richard et Loomis ont étudié pour la première fois leurs effets chimiques (Et Taouil, 2011).

Des études ont ensuite rapidement permis d'observer des modifications du milieu dans lequel les ultrasons se propageaient. Dans ce contexte, les travaux de Robert William Wood (1868– 1955) et d'Alfred Lee Loomis (1887-1975) en biologie ainsi que ceux en chimie de Theodore William Richards (1868-1928) et d'Alfred Lee Loomis sont considérés comme les premières expérimentations sonochimiques (Woods et al., 1927; Richards et al., 1927).

Dès les années 1940, les recherches se développèrent rapidement et d'autres applications militaires, industrielles ou domestiques virent le jour (Et Taouil, 2011). Neppiras, (1980); utilise a pour la première fois le terme de « sonochimie » dans une revue sur la cavitation. Quelques années plus tard, Jean-Louis Luche décrit les effets vrais et faux de la sonochimie et un grand nombre de réactions réalisées sous ultrasons a été rapporté, offrant de nombreuses perspectives.

## **2. Système Ultrasonore**

L'échographie devient une technologie en constante évolution dans le monde pratique de la science et de la technologie alimentaires. La technique d'ultrason a permis de conserver la qualité fraîche, la sécurité microbienne et la valeur nutritionnelle des aliments. Les ondes ultrasonores sont des ondes très courtes, qui sont générées par le potentiel électrique d'un matériau.

L'échographie peut être combinée avec d'autres méthodes pour augmenter l'efficacité des méthodes de transformation et de conservation des aliments. L'échographie est une sorte d'ondes mécaniques dont la fréquence est comprise entre 20 kHz et 1 MHz (Sowmya et Vijayakumar, 2020).

## **3. Principe**

La cavitation acoustique est le principe de base des ultrasons, car les ondes sonores se propagent à travers n'importe quel milieu, une énergie excessive produite en raison de la sonication, ce qui provoque la formation d'une cavitation inertielle. En raison de la présence de cavitations inertielles, des bulles d'air se sont formées dans le milieu liquide (Sowmya et Vijayakumar, 2020).

Les ondes acoustiques induisent la compression et l'expansion des échantillons (effet d'éponge), créent des canaux microscopiques dans l'échantillon et conduisent ainsi à la fuite de liquide intracellulaire vers l'environnement. Lorsque la puissance ultrasonore est suffisamment élevée, le cycle de raréfaction peut dépasser les forces d'attraction des molécules liquides et alors des bulles de cavitation sont produites. 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 (Dan et al., 2020).

Avec la variation de taille des bulles et l'effondrement ultérieur des bulles, un micro-flux puissant peut être créé. Le micro-ruissellement induira une agitation dramatique et améliorera ainsi le transfert de chaleur et de masse pendant la transformation des aliments. De plus, un micro-jet dans la bulle peut également être généré avec l'implosion de bulles de cavitation proches de l'interface solide-liquide. Le micro-jet améliore également le transfert de masse et de chaleur entre le liquide et le solide en cassant la couche limite de diffusion respective (Rodríguez et al., 2019).



#### 4. Classification des ultrasons

Il est généralement admis que les ultrasons sont divisés en trois catégories:

- **Les ondes ultrasonores de faible intensité ou haute fréquence:** Elles sont également décrites comme des ondes de diagnostic et ont une fréquence caractéristique supérieure à 100 kHz et des intensités inférieures à  $1 \text{ W/cm}^2$ . Ces vagues peuvent être utilisées pour évaluer la structure (forme, taille et dimensions) du produit alimentaire, déterminer la composition des produits alimentaires frais.

Le principe de fonctionnement des ultrasons à basse énergie consiste à exploiter efficacement l'interaction entre la matière et les ondes sonores à haute fréquence pour obtenir des informations détaillées dans le contexte de la structure, des dimensions et de la composition du produit à travers lequel il se diffuse.

De plus, l'atténuation se produit en raison de la perte d'énergie lors de la compression et de la décompression des ondes. Le mécanisme d'absorption s'associe à l'homogénéité et à la diffusion avec des matériaux hétérogènes qui fournissent des informations sur les attributs physico-chimiques du matériau (Bhargava et al., 2021).

- **Les ondes ultrasonores de haute intensité et basse fréquence:** Sont caractérisées comme perturbatrices et induisent ainsi des effets considérables sur les propriétés physiques, biochimiques et mécaniques des produits alimentaires contrairement aux ultrasons de faible puissance. Leur fréquence varie de 20 à 100 kHz tandis que les intensités sont de l'ordre de 10 à  $1000 \text{ W/cm}^2$ . Il a également des applications importantes dans de nombreuses opérations unitaires de congélation, séchage, attendrissement, concentration, décongélation. Les ultrasons de haute intensité sont caractérisés par l'induction d'une cavitation acoustique due à la production, à la croissance ultérieure et à l'effondrement soudain de bulles plus grosses libérant une grande quantité d'énergie (Bhargava et al., 2021).

- **Les ultrasons à haute fréquence (5 à 10 MHz):** Sont les ondes de faible intensité qui sont principalement utilisées à des fins analytiques telles que la détermination des compositions alimentaires (Xiuxiu et al., 2019).

#### 5. Installation ultrasonique

Les équipements de traitement et d'extraction par ultrasons sont différents (à l'échelle du laboratoire ou dans un environnement industriel). En effet, à petite échelle, on recense deux dispositifs: le bain à ultrasons et la sonde à ultrasons (Bouras, 2015). Le bain a été traditionnellement utilisé dans la transformation des aliments en raison de sa disponibilité précoce. Dans une recherche récente, les sondes à ultrasons semblent être citées aussi souvent que les bains (Tian et al., 2004). Elles sont utilisées dans le domaine de l'extraction, et la configuration de la

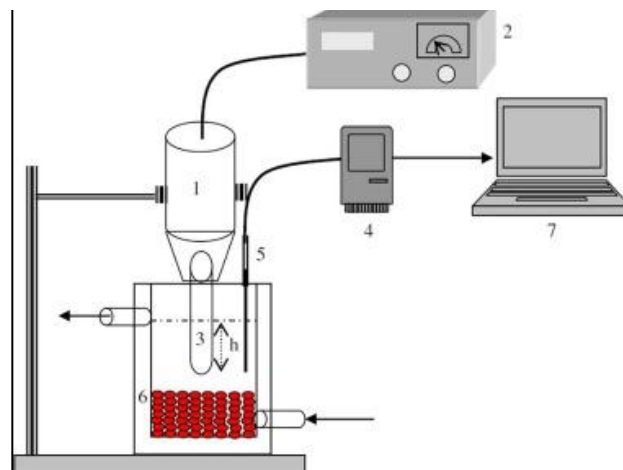
sonde permet une propagation axiale des ondes sonores avec des dissipations radiales dans la suspension (solide et liquide) (Bouras, 2015).

L'équipement ultrasonique comprend le générateur d'énergie électrique, le transducteur (s) et un émetteur, qui envoie physiquement les ondes ultrasonores dans le milieu (Dan et al., 2020).

➤ **Générateur électrique:** Le générateur électrique est la source d'énergie pour le système à ultrasons, ce qui doit entraîner le transducteur. Généralement, un générateur électrique produit un courant électrique avec une puissance spécifiée (Dan et al., 2020).

➤ **Transducteur:** Tous les systèmes à ultrasons comprennent un transducteur comme élément central. Le transducteur convertit l'énergie électrique (ou d'énergie mécanique, dans le cas du coup de sifflet liquide) en énergie sonore en faisant vibrer mécaniquement à des fréquences ultrasoniques (Lee et al., 2003).

➤ **Emetteur:** Le but de l'émetteur, aussi appelé le réacteur par certains, et par d'autres cellules par ultrasons, consiste à irradier l'onde ultrasonore provenant du transducteur dans le milieu. L'émetteur peut également jouer le rôle d'amplifier les vibrations ultrasonores tout en les irradiant (Dan et al., 2020).



**Figure 12:** Montage expérimental d'un système ultrasonique: (1) transducteur à ultrasons, (2) générateur d'ultrasons, (3) sonde à ultrasons (19 mm), (4) enregistreur de données, (5) sonde de température, (6) bocal en verre gainé, (7) ordinateur et (h) profondeur de la sonde dans l'eau (2,5 cm) (Dan et al., 2020).

## 6. Facteurs influençant les phénomènes de cavitation

La cavitation est influencée par des paramètres propres à l'onde (fréquence, puissance), mais aussi par les propriétés du milieu sonore, le temps de traitement et les conditions opératoires.

### a) La fréquence

La fréquence des ultrasons a un effet majeur. En effet, à des fréquences sonores élevées, de l'ordre du MHz, la production de bulles de cavitation devient plus difficile que dans les basses fréquences sonores, de l'ordre du kHz. L'explication réside dans les cycles de compression et de dépression, à hautes fréquences, les cycles provoqués par les ondes sonores sont si courts que les

molécules du liquide ne peuvent pas être séparées pour former une bulle de vide. Ceci provoque l'absence de la cavitation (**Bouras, 2015; El darra, 2013**).

#### *b) La température*

La température intervient également au niveau de la viscosité et la pression de vapeur du milieu. En effet, l'augmentation de la température permet d'améliorer la solubilité des molécules et leurs coefficients de diffusion. Cependant, l'abaissement de la température favorise les réactions sonochimiques car l'intensité de la cavitation est meilleure à des températures faibles (**Bouras, 2015**).

#### *c) La puissance*

Selon plusieurs études scientifiques, la puissance est un paramètre très important ; son augmentation facilite l'endommagement cellulaire. Il existe trois mécanismes interconnectés à travers lesquels la puissance des ultrasons augmente l'efficacité du processus :

- la destruction des cellules par l'action des micro-jets produits lors de l'implosion des bulles de cavitation près de la surface du solide, augmente la perméabilité du tissu.
- l'amélioration de la pénétration du solvant dans la cellule et la solubilité des composés due aux températures et aux pressions élevées dans la zone de cavitation;
- l'amélioration du processus de diffusion du fait de l'agitation provoquée par les ultrasons (**Bouras, 2015**).

## **7. Mécanisme d'action**

Deux types de cavitation ont été observés à avoir des effets différents :

*La première est la cavitation stable:* Ce qui se produit en raison à des oscillations des ondes ultrasonores, induisant la formation de minuscules des bulles dans le liquide. L'effondrement des bulles ne se produit pas dans ce processus, mais nécessite des milliers de cycles d'ultrasons oscillant vagues pour augmenter la taille des bulles (**Cárcel et al., 2012**). Comme les ondes d'ultrasons passent à travers le milieu, des bulles vibrées, et cavitation met en place des courants dans le liquide adjacent à la vibration des bulles ; les courants exercent à leur tour un mouvement de rotation et de torsion sur les zones proches. De petites bulles se déplacent à travers le champ sonore et créer des microcourants. Cet effet est appelé un microjets.

Cette manifestation offre forces importantes, qui frottent contre la surface des cellules et perturber la membrane cellulaire pour induire la rupture de la paroi cellulaire. À proximité de vibration des bulles de gaz, de rotation, forces et contraintes affectent les organites intracellulaires (**Leadly et Williams, 2006**).

*Le deuxième type est la cavitation transitoire*: où la taille des bulles augmente au sein de quelques cycles oscillatoires et puis s'effondrent, provoquant un stress cellulaire. La pression peut perturber la structure de la paroi cellulaire, entraînant une fuite de la cellule.

Des changements dans la pression et la température n'affectent pas les cellules, seulement ces cellules à proximité immédiate (Cárcel *et al.*, 2012; Leadley et Williams, 2006).

## **8. Applications de la technologie des ultrasons dans la transformation alimentaire**

L'application de la technologie par ultrasons a fait l'objet de nombreux rapports. L'échographie à basse puissance et haute fréquence (>2 MHz), ayant des effets physiques et/ou chimiques minimaux sur les constituants alimentaires, a été utilisée comme technique d'évaluation non destructive de la qualité. Tandis que les ultrasons à basse fréquence (<1 MHz), induit des changements physiques et chimiques souhaités dans les aliments, ont été utilisés pour une gamme d'applications de traitement (Kumari *et al.*, 2018).

Les systèmes de type à contact ultrasonores conviennent à diverses applications de traitement des aliments, telles que l'émulsification, le dégazage de liquides, la séparation des graisses, intensification du transfert de chaleur et de masse, pasteurisation d'aliments liquides, extraction de substances bioactives augmentation et taux de congélation (Kumari *et al.*, 2018).

La technologie des ultrasons a également été utilisée pour plusieurs aliments solides. Il a été démontré que le traitement par ultrasons des aliments liquides entraînait des améliorations significatives de la qualité des aliments. Cependant, les applications des ultrasons dans les aliments solides sont plus difficiles que les aliments liquides. Les ultrasons ont montré des effets positifs et négatifs sur la qualité des aliments solides en fonction de l'application et des conditions de traitement utilisées (Kumari *et al.*, 2018).

L'application d'ultrasons pour améliorer les taux de séchage tout en maintenant ou en améliorant la qualité du produit a été abondamment rapportée. L'application par ultrasons peut déclencher divers effets physiques et mécaniques, susceptibles de réduire les couches limites de diffusion, d'augmenter le transfert de masse et d'accélérer les vitesses de diffusion/déshydratation. De plus, de nombreuses études ont démontré que l'utilisation des ultrasons au cours d'un processus de séchage pouvait réduire les pertes en composés bioactifs (Kumari *et al.*, 2018).

La congélation assistée par ultrasons a été étudiée pour améliorer la qualité des produits alimentaires congelés par divers mécanismes, notamment l'initiation de la nucléation, le contrôle de la taille des cristaux de glace, l'accélération du taux de congélation et l'amélioration de la conservation de la qualité des aliments congelés (Kumari *et al.*, 2018).

La congélation assistée par ultrasons entraîne une amélioration significative des propriétés texturales, de la couleur et une activité enzymatique réduite dans les produits alimentaires (**Islam et al., 2014; Zhan et al., 2017**). Des études ont montré que l'application des ultrasons pendant la congélation augmente la probabilité de la nucléation dans l'eau en surfusion en fonction de l'intensité de l'échographie appliquée (**Kumari et al., 2018**).

# **Chapitre 3**

## **Méthodes de Conservation**

Depuis des siècles, l'homme a recherché des méthodes pour conserver sa nourriture, entre le moment où les denrées sont capturées, cueillies ou récoltées et celui de la consommation (**Jean-pierre, 2000**).

La conservation des aliments est la science qui consiste à prolonger la durée de conservation des aliments, à maintenir autant que possible la qualité nutritionnelle, à éviter la croissance de micro-organismes indésirables et retarder l'oxydation des graisses qui provoque le rancissement. Il existe plusieurs façons de conserver les aliments (**Aste et al., 2017**).

## **1. Différentes techniques de conservation**

Il existe plusieurs techniques qui permettent d'augmenter la durée de vie des aliments et les recherches dans ce domaine sont constantes.

Les méthodes courantes de conservation de la nourriture reposent principalement sur un transfert d'énergie ou de masse qui ont pour objet d'allonger la durée de vie des produits alimentaires (pasteurisation et stérilisation, séchage, réfrigération, congélation et autres) ou de les transformer par le jeu de réactions biochimiques ou de changement d'état (cuisson, fermentation obtention d'état cristallisé ou vitreux et autres (**Aste et al., 2017**).

## **2. Conservation par séchage**

Le séchage est l'une des opérations de conservation des aliments les plus anciennes et les plus largement appliquées. Les technologies de séchage sont des opérations unitaires très importantes pour réduire la teneur en humidité avec une excellente application au secteur de la fabrication alimentaire.

Les produits finaux se présentent généralement sous la forme de poudre, de flocons, de granulés, de feuilles ou de particules de différentes formes selon les exigences du fabricant et le type de technologies de séchage utilisées dans le processus. Ces processus facilitent normalement le stockage à long terme, empêchent la contamination microbienne et d'autres réactions chimiques néfastes dans les matières alimentaires telles que le brunissement enzymatique et non enzymatique, et la rétention d'éléments nutritifs tels que les macronutriments (protéines, sucres, fibres, vitamines et minéraux) ou des composés bioactifs (composés phénoliques, caroténoïdes, isoflavones) (**Menon et al., 2020; Llavata et al., 2020**).

La qualité du produit obtenu dépend largement de la méthodologie utilisée. En général, les procédés qui impliquent de basses températures (comme la lyophilisation) nécessitent de longs temps de séchage, de sorte que les techniques de séchage à haute température sont plus étendues, bien que cela puisse compromettre la qualité. Ainsi, l'industrie alimentaire est confrontée au défi d'obtenir des temps de séchage plus courts dans des conditions modérées et de maximiser la qualité du produit (**Llavata et al., 2020**).

Le déroulement du séchage peut être influencé par une grande variété des facteurs indépendants, tel que les conditions de séchage (la température, la vitesse et l'humidité relative de l'air), ainsi les propriétés du solide (la densité, la porosité et l'hygroscopicité) (**Hnachi, 2009**).

### **2.1. Objectif du séchage**

L'objectif principal du séchage est de diminuer l'activité de l'eau ( $a_w$ ) de divers matériaux périssables qui consiste de convertir ce dernier en produits stabilisés. Il consiste à enlever l'excès d'humidité d'un produit par évaporation de l'eau pour empêcher la croissance et le développement de la détérioration et les microorganismes pathogènes, réduire l'activité des enzymes et le taux auxquels les changements chimiques indésirables se produisent, afin de permettre leur stockage à la température ambiante (**Bonazzi et al., 2011**).

Les principaux objectifs technologiques de la déshydratation des produits alimentaires sont (**Zeki, 2009**):

- ✓ La préservation des aliments comme étant le résultat d'une réduction de l'activité d'eau.
- ✓ La réduction du poids et du volume des aliments.
- ✓ La transformation des aliments à une forme plus pratique pour le stockage, l'emballage, le transport et l'utilisation.
- ✓ La production des nouveaux aliments de saveur et de texture souhaitables pour une seconde transformation.

### **2.2. Mécanismes intervenants au cours du séchage**

Le processus de séchage implique l'élimination de l'humidité non liée (libre) de la surface en premier, puis de l'humidité liée de l'intérieur du produit alimentaire jusqu'à ce qu'une limite définie soit atteinte. Il implique des opérations simultanées de transfert de chaleur et de masse. Lors de ces opérations, le produit agricole est pleinement exposé à des conditions de séchage de température et d'humidité relative de l'air, améliorant ainsi l'opération de séchage (**Babu et al., 2018**).

#### **2.2.1. Transferts de la chaleur**

Pendant le séchage, la chaleur est transférée au produit selon trois mécanismes (**Ayad et Bouharoun, 2015**).

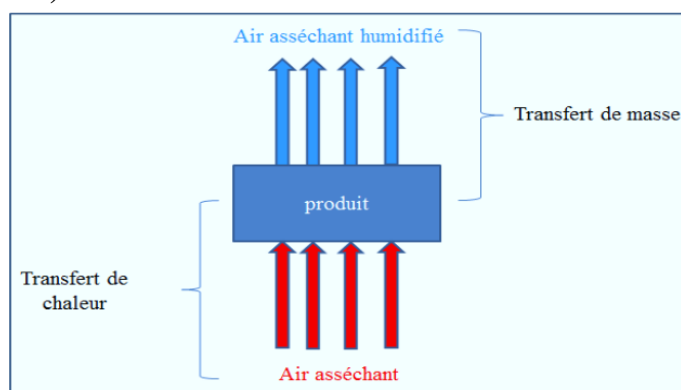
- Par Convection : Dans ce cas le produit à sécher reçoit un courant gazeux chaud qui fournit la chaleur nécessaire à l'évaporation du liquide et entraîne la vapeur formée.
- Par Conduction : Dans ce cas le mécanisme se base sur un contact direct du produit avec une surface chauffante sur laquelle il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



### 2.2.2. Transferts de matière

Le séchage se distingue des autres opérations de déshydratation par le fait que l'eau est enlevée du produit exclusivement par évaporation. Le processus doit avoir le gradient de la pression partielle de vapeur d'eau entre la surface du produit et le milieu extérieur pour une force motrice.

Le milieu extérieur doit également assurer un débit de chaleur permettant de maintenir la surface du matériau à une température permettant de fournir la chaleur nécessaire à la vaporisation de l'eau (Ayad et Bouharoun, 2015).



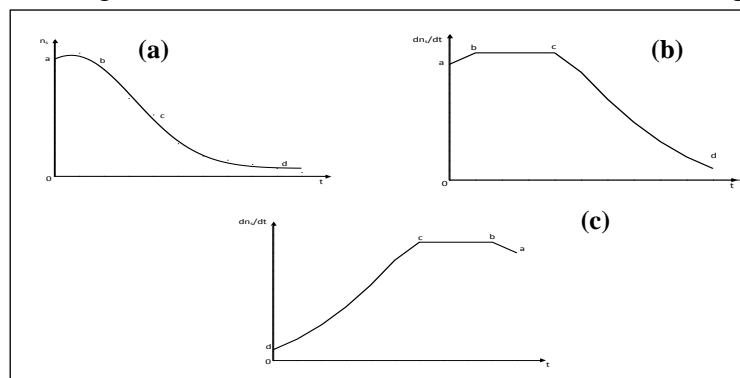
**Figure 13:** Mode de transfert lors du séchage (Guessoum et Houti, 2016).

### 2.3. Cinétique du séchage

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 Cavaile, 2003):

1. Le taux d'humidité du produit ( $n_s$ ) en fonction du temps ( $t$ ), c'est une courbe de séchage dont la forme la plus complète (c'est-à-dire lorsque toutes les phases de séchage existent) (figure 14(A)).
2. L'allure de séchage ( $dn_s/dt$ ) en fonction du temps ( $t$ ) (figure 14(B)).
3. L'allure de séchage ( $dn_s/dt$ ) en fonction du taux d'humidité ( $n_s$ ) (figure 14(C)).



**Figure 14:** Courbes d'évolution de la teneur en eau du produit au cours du temps  
a) allure de séchage, b) allure de séchage en fonction du temps  
et c) allure de séchage en fonction d'humidité (Hnachi, 2009).

***Phase 1: période de mise en température du produit***

La première phase (vitesse de séchage croissante) est courte, correspond à l'augmentation en température du produit jusqu'à atteindre une température d'équilibre. La vitesse de séchage sera croissante puisque l'échange d'eau entre le produit et l'air sera d'autant plus efficace que le produit sera réchauffé (Noomhorm, 2007).

***Phase 2: période de vitesse de séchage constante***

La deuxième phase, correspond à l'évaporation de l'eau libre en surface du produit, sans cesse renouvelée par de l'eau venant de l'intérieur du produit (en partie similaire au phénomène de transpiration). La vitesse de séchage reste presque constante et la teneur en humidité diminue linéairement avec le temps (Sinha et Bhargav, 2020).

Toutefois, la phase 2 est une phase qui présente un risque de dégradation spécifique du produit: le croûtage. Ce phénomène est spécifique à la phase 2 du séchage après extraction de l'eau libre du produit. Le croûtage est dû à la capacité limitée de diffusion de l'eau dans le produit. Si la capacité évaporatoire: de l'air est très forte, l'eau va s'évaporer plus vite à la surface du produit qu'à l'intérieur: la surface deviendra dure et sèche. Elle empêchera la diffusion ultérieure de l'eau contenue dans le produit (Noomhorm, 2007).

***Phase 3: période de ralentissement du séchage***

La troisième phase (ralentissement de la vitesse de séchage) correspond à l'évaporation de l'eau liée. La vitesse de séchage est limitée par le taux de transport de l'humidité et / ou de la vapeur des régions internes vers la surface externe par diffusion et diminue donc continuellement (Sinha et Bhargav, 2020).

L'eau libre, qui migrait de l'intérieur vers l'extérieur du produit pour être alors transformée en vapeur d'eau, a complètement disparu en fin de phase II. Un front d'évaporation s'enfonce vers le cœur du produit. La vapeur d'eau est ensuite évacuée en surface par l'air. Plus le front s'éloigne de la surface extérieure du produit, plus le transfert d'eau est difficile.

Au cours de cette phase de séchage, l'eau à éliminer du produit est de plus en plus liée, et de plus en plus difficile à évaporer (Sinha et Bhargav, 2020).

Pendant cette période, la teneur en humidité diminue continuellement avec le temps et la vitesse de perte d'humidité dépend des paramètres de fonctionnement.

Lors de cette phase, une température de l'air chaud légèrement inférieure de quelques degrés à cette température maximale permet de garantir cette sécurité tout en optimisant la vitesse d'évaporation (Noomhorm, 2007). La durée et la vitesse de séchage à chaque période déterminent la teneur en humidité et l'état de la matière alimentaire.

Le taux d'humidité (MR) est calculé en utilisant l'équation (1):

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_t} \quad (3)$$

Où «  $M_t$  » est la teneur en eau au moment (t), «  $M_0$  » est la teneur en humidité initiale et «  $M_e$  » est la teneur en humidité d'équilibre (le tout en kg d'eau par kg de matière sèche).

Le taux de séchage (DR) est calculé en utilisant l'équation (2):

$$DR = \frac{M_t - M_{t+\Delta t}}{\Delta t} \quad (4)$$

Où «  $M_{t+\Delta t}$  » est la teneur en humidité (kg d'eau par kg de matière sèche) à «  $t+\Delta t$  » et «  $t$  » est le temps en min.

## 2.4. Méthodes de séchage

Divers procédés de séchage ont été appliqués pour traiter et conserver les aliments, chacun ayant ses propres avantages et inconvénients spécifiques concernant l'efficacité du séchage, la commodité de fonctionnement, la consommation d'énergie et la qualité du produit. À l'échelle industrielle, les principales technologies de séchage utilisées pour la transformation et la conservation des aliments comprennent le séchage au soleil (SD), le séchage à l'air chaud (HAD), le séchage par pompe à chaleur (HPD), le séchage par micro-ondes (MD), le séchage par rayonnement infrarouge lointain (FIRD) et lyophilisation (FD).

## 2.5. Avantages et inconvénients du séchage

### 2.5.1. Avantages du séchage

Les principaux avantages du procédé de séchage sont:

- ✓ 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 récoltes.
- ✓ La diminution des coûts financiers et environnementaux liés au transport des marchandises en raison de la réduction massique (Nguyen, 2015).

### 2.5.2. Inconvénients du séchage

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 et la modification de la répartition de l'humidité dans le produit. En général, le séchage a globalement moins d'inconvénients que d'autres procédés de conservation (appertisation, congélation ou traitement aseptique). Le séchage des fruits, des légumes et des épices reste encore une méthode très répandue de conservation de ces aliments (Nguyen, 2015).

## **2.6. Quelques méthodes du séchage appliqué sur l'ail**

Différentes méthodes de séchage ont été largement utilisées pour la conservation de l'ail. Nombreuses études liées à l'ail séché utilisant différentes techniques telles que le microonde sous vide, l'air chaud, les micro-ondes, l'infrarouge, la lyophilisation. Ils ont été effectués dans le but de trouver les conditions de séchage qui confèrent à l'ail séché avec une bonne qualité tout en nécessitant des temps de séchage courts. Ces études sont représentées dans le tableau 5.

Cependant, aucune étude n'a examiné l'effet des prétraitements par CEP, déshydratation osmotique et ultrason sur le séchage de l'ail. Ces derniers sont bien étudiés dans la partie expérimentale.

## **3. Conservation par froid**

La conservation au froid s'est largement répandue pour les produits bruts, mais a aussi permis l'essor d'une nouvelle génération d'aliments: les denrées prêtes à l'emploi. Cette évolution est liée à d'importantes mutations technologiques. D'une part des investissements considérables ont été réalisés, aux différentes étapes de la production et de la distribution, pour assurer une chaîne du froid performante. D'autre part de nouveaux procédés de fabrication et de conditionnement permettent aujourd'hui d'obtenir des produits prêts à l'emploi se conservant au froid pendant plusieurs semaines (**Santos et al., 2015**).

Le froid a pour conséquence essentielle d'allonger la durée de vie des fruits et légumes en retardant leur altération. En effet il inhibe les réactions enzymatiques, notamment celles qui sont à l'origine de la biosynthèse de l'éthylène par les fruits et légumes. Ce gaz est responsable de leur sénescence et de leur mûrissement (**Vierling, 2007**).

Par ailleurs la perte en eau des fruits et légumes est un élément à surveiller particulièrement. En effet au-delà de 4 à 6% de perte de leur poids initial, des altérations de la qualité se produisent, caractérisées essentiellement par un flétrissement irréversible. Le refroidissement, principale étape où cours de laquelle les pertes d'eau ont lieu, est à maîtriser (**Jeantet et al., 2006**).

### **3.1. Techniques de conservation par froid**

#### **3.1.1. Réfrigération**

La réfrigération correspond à une conservation par le froid positif pendant une durée limitée (de quelques jours à quelques semaines) puisque les produits réfrigérés bénéficient d'une date limite de consommation. Généralement la température de réfrigération se situe dans les alentours de 0°C à 4°C.

La réfrigération tend à conserver les aliments dans un état très voisin de leur état initial en ralentissant les réactions chimiques et enzymatiques et en retardant la multiplication des

microorganismes (**Boumendjel, 2005**). En plus, le principal avantage de la réfrigération est qu'elle n'a aucun effet sur le goût ou la texture des aliments (**Aste et al., 2017**)

Il existe trois règles fondamentales à respecter dans l'application de froid:

- La réfrigération doit s'appliquer à des aliments sains au départ.
- Le refroidissement doit être fait le plus tôt possible.
- La réfrigération doit être continue tout au long de la filière de distribution: la chaîne de froid ne doit pas être interrompue (**JEAN, 2014**).

En général, les facteurs influençant la teneur en éléments nutritifs 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 de prolonger la durée de conservation et de limiter la perte de qualité en réduisant les processus métaboliques tels que la respiration et la transpiration (**Aste et al., 2017**).

Les aliments cuits doivent plutôt être stockés entre 0°C et 4°C et la période de stockage recommandée est généralement de 3 jours, tandis que la température de stockage optimale pour les produits secs est généralement de 10°C à 20°C et la période de conservation peut durer plusieurs mois.

La réfrigération des légumes à une température légèrement supérieurs à 0°C le plus tôt possible après la récolte est un facteur de qualité qui prolonge leur conservation. Cela peut permettre une meilleure gestion commerciale: le rythme d'écoulement vers le consommateur peut être bien différent de celui des récoltes, ce qui nécessite un stockage intermédiaire dans des conditions propre à chaque végétale (**Bimbenet et al., 2002**).

### **3.1.2. Congélation**

La congélation est l'une des techniques les plus couramment appliquées pour la conservation des produits alimentaires dans le but de conserver leurs propriétés nutritionnelles et sensorielles initiales. Elle a généralement lieu à -18°C. La congélation combine les effets de la diminution de la température et de celle de l'activité d'eau. Ces effets permettent de conserver les aliments pendant longue durée à température négative (**Cheng et al., 2015**).

Les réactions biochimiques et physico-chimiques sont ralenties pendant le stockage congelé des aliments, qui sont responsables de la perte de nutriments, des changements indésirables de couleur, de texture et du développement de mauvais goût. La cristallisation de la glace est l'étape clé, qui influe sur l'efficacité de la congélation (**Qiu et al., 2020**).

En général, les processus de congélation sont divisés en deux étapes:

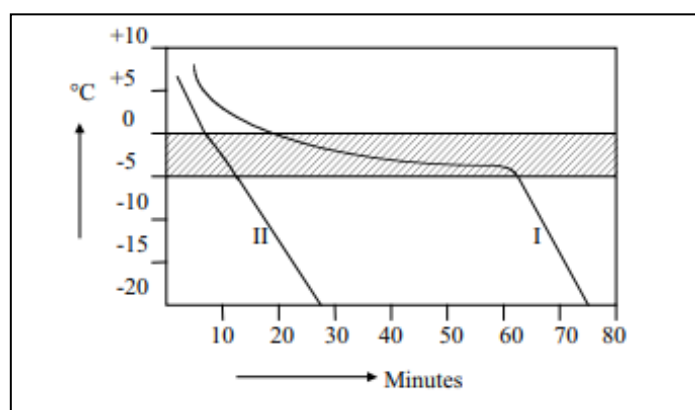
- L'étape de refroidissement (c'est-à-dire le refroidissement de l'échantillon au point de congélation).

➤ L'étape de transition de phase (c'est-à-dire la cristallisation de l'eau) (**Liu et al., 2020**).

Le contrôle de la température du produit pendant la congélation est reconnue comme une technique importante pour maintenir la qualité du produit. En particulier, des facteurs tels que la vitesse de refroidissement, la durée de la période de croissance des cristaux de glace et la température du point final ont une importance critique.

Le taux de congélation est directement lié à la taille, à la morphologie et à la distribution des cristaux de glace dans les aliments congelés et par conséquent, affecte fortement la texture et la perte de goutte après la décongélation des aliments.

Les méthodes de congélation couramment utilisées dans l'industrie alimentaire sont le jet d'air, le contact de plaque, la congélation cryogénique, la congélation à lit fluidisé, la congélation par immersion et une combinaison de ces techniques (**Kono et al., 2021**).



**Figure 15:** Cristallisation de la glace: (I) congélation lente, (II) réfrigération rapide (**Nout et al., 2003**).

### 3.1.3. Surgélation

D'après **Jeantet et al., (2006)**; le terme « surgélation »: il garantit que le produit est congelé le plus rapidement possible à une température égale ou inférieure à  $-18^{\circ}\text{C}$ , puis maintenu à cette température pendant toute la durée de stockage.

Il peut surgeler les légumes, les fruits, certains fromages, le beurre, les œufs, les jus de fruits, les viandes, les produits de la pêche, les plats cuisinés, la pâtisserie et autres desserts.

La surgélation permet d'obtenir des produits de meilleure qualité évitant la perte de la vitamine C, le rancissement des lipides ou l'altération des matières colorantes (**Boumendjel, 2005**).

#### a) Super refroidissement

Le super refroidissement (également appelé dépression du point de congélation, ou sous-refroidissement) est un processus par lequel la température d'une matière alimentaire est abaissée en dessous de son FT sans cristallisation de la glace due à une barrière énergétique (**James et al., 2011**). Il existe trois conditions préalables importantes pour appliquer avec succès la technologie de super refroidissement, à savoir la faisabilité du super refroidissement, le degré maximal de

dépression du point de congélation avant la nucléation et la stabilité de l'état de super refroidissement dans des aliments spécifiques (**Liu et al., 2020**).

Le «degré de sur-refroidissement» est défini comme la température inférieure au FT pouvant être atteint pendant la phase de refroidissement sans nucléation ni formation de cristaux de glace. une étude réalisée à la Food Refrigeration and Process Engineering Research Centre de l'Université de Bristol (FRPERC), les phénomènes de super-refroidissement pour une grande variété de légumes, y compris les gousses d'ail et les bulbes, le brocoli, le chou-fleur, les carottes, les poireaux, les panais et les échalotes ont révélé que, bien que le super-refroidissement se soit produit dans tous des variétés détectées, les occurrences de sur-refroidissement avant nucléation, FT et le degré maximum de sur-refroidissement pour chaque espèce différaient considérablement (**Liu et al., 2020**).

De plus, la même étude a révélé que certains légumes (par exemple, l'ail et les échalotes) pouvaient être maintenus à l'état de super-refroidissement (aussi bas que -10°C pour certains échantillons) pendant des semaines sans congélation et rester plus stables que les autres espèces (**James et al., 2011**).

Alors que les études sur l'efficacité de conservation super-refroidissement seul sur les espèces de fruits et légumes sont rares et insatisfaisantes, de nombreuses études ont démontré que le super-refroidissement combiné à d'autres technologies peut améliorer l'état des fruits et légumes, améliorant la durée de conservation réalisable et la qualité du produit (**Liu et al., 2020**).

En outre, des températures proches de FT dans les plages de températures de super-refroidissement ont été utilisées avec succès pour la conservation de certains fruits ces dernières années (**Liu et al., 2020**).

#### ***b) L'utilisation du super-refroidissement***

La super-réfrigération est en train de devenir une technologie de conservation importante après la réfrigération et la congélation en raison de ses effets de conservation exceptionnels (**Thinh et al., 2016**).

Dans cette zone de température, le produit est dans un état de congélation partielle ou légère et peut présenter une certaine tolérance à cet état. Ainsi, si la température ne tombe pas en dessous de la limite de tolérance à basse température du fruit, la super-réfrigération inhibera non seulement les réactions de détérioration et la croissance et la reproduction des micro-organismes, prolongeant ainsi considérablement la durée de conservation, elle maintiendra largement la vie état des cellules biologiques.

Une petite quantité de cristaux de glace formés à la surface ou à l'intérieur des tissus peut servir de réservoir de refroidissement pour maintenir temporairement l'équilibre de la

température et améliorer la résistance mécanique des tissus et leur résistance aux dommages cinétiques pendant l'emballage, le stockage et le transport. En outre, la super-réfrigération peut réduire les coûts énergétiques par rapport à ceux du stockage congelé (**Liu et al., 2020**).

#### **4. Entreposage de l'ail**

L'ail et sa physiologie particulière, peut être conservé suivant deux méthodes : soit au chaud, soit au froid. Les températures qui encourage le plus la germination des bulbes (la croissance du germe à l'intérieur des caïeux) se situent entre 5 et 10°C. Il faut donc à tout prix éviter que les bulbes soient exposés à ces températures (**Leblanc, 2012**).

- L'entreposage en chambre réfrigérée entre 0 et -1°C qui permet la meilleure conservation à long terme. Cette méthode n'est cependant conseillée que pour l'ail destiné à une consommation rapide puisque dès qu'on le sort de la chambre froide, cet ail germe rapidement (20 à 30 jours). L'ail conservé de cette manière ne peut pas non plus être utilisé comme semence.
- L'entreposage à la chaleur est quant à lui plus simple à réaliser puisque les températures requises sont voisines des températures ambiantes. Les recommandations varient cependant selon la référence consultée, probablement parce que l'optimal varie également selon la variété utilisée (**Leblanc, 2012**).

En pratique, les producteurs d'ail arrivent à bien conserver leur ail à des températures variant entre 15 et 18°C.

Le taux d'humidité de l'entrepôt doit aussi faire l'objet d'un suivi rigoureux.

- Une humidité trop faible entraîne à long terme une déshydratation des caïeux, ce qui diminue la valeur commerciale des bulbes.
- Une humidité trop élevée risque pour sa part de déclencher l'initiation des racines à la base des caïeux.
- A plus de 85% d'humidité relative, ce sont les maladies qui risquent en plus de recommencer à être actives.

Comme dans tout entrepôt, la ventilation demeure essentielle pour l'uniformisation de la température et de l'humidité (**Leblanc, 2012**).



Tableau 5: Synthèse de quelques travaux sur l'ail.

Techniques de conservation	Paramètres	Principaux Résultats	Références
<b>Rôle des techniques de séchage sur les caractéristiques physiques, de réhydratation, de saveur, de composés bioactifs et d'antioxydants de l'ail</b>	<p>Les expériences de séchage ont été réalisées comme suit:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lyophilisation sous vide (VFD): pré-congelées à -40°C pendant 3h, puis séchées à -18°C.</li> <li>• Séchage à l'air chaud (HAD) et Séchage à l'humidité relative (RHD) : 60°C et une vitesse de l'air de 2 m/s.</li> <li>• Séchage à l'air chaud infrarouge (IRHAD) : 675W et de 2,8 à 3,1µm. La température et la vitesse de séchage étaient de 60°C et 2 m/s respectivement.</li> <li>• Séchage sous vide pulsé (PVD) vide (0,01 MPa) et température de séchage 60°C.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ La VFD a fourni des tranches de l'ail avec une couleur attrayante, un faible retrait, une faible dureté et la plus faible capacité de réhydratation.</li> <li>✓ les tranches d'ail séchés par HAD a un taux de retrait volumique, une stabilité thermique et une stabilité au stockage les plus élevés.</li> <li>✓ Les deux méthodes IRHAD et RHD ont fourni Les échantillons séchés caractérisées par une capacité de réhydratation, une teneur en composés bioactifs et l'activité antioxydant les plus élevées.</li> </ul>	<b>Yabin Feng et al., (2021)</b>
<b>Effet du prétraitement des cycles de congélation-décongélation sur le processus de lyophilisation sous vide et les propriétés physico-chimiques des tranches d'ail séchées</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le prétraitement de congélation a été fait dans lyophilisateur à -25°C puis décongélation à 25°C.</li> <li>• Le séchage a été réalisé dans un lyophilisateur sous vide dont : degré de vide 0.518 mbar T° : -18°C et -85°C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Le prétraitement FTC a réduit le temps de séchage et la consommation d'énergie.</li> <li>✓ Le prétraitement FTC a amélioré la stabilité thermique et la qualité des produits à l'ail.</li> </ul>	<b>YabinFeng et al., (2020)</b>

<p><b>Amélioration du processus de séchage infrarouge catalytique et des caractéristiques de qualité des tranches d'ail séchées par prétraitement à l'alcool assisté par ultrasons</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les prétraitements utilisés sont: <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ L'alcool: une solution d'éthanol à 75% (v/v) à <math>25 \pm 1^\circ\text{C}</math> pendant 30 min.</li> <li>➢ Ultrason: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Trois fréquences (20, 40 et 60 kHz), une densité de puissance de 50 W/L avec 10s de pulsation marche et arrêt,</li> <li>○ Solution : alcool (US+ alcool) et eau (US+ eau).</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>• Les expériences de séchage ont été réalisées dans un appareil de séchage infrarouge à <math>60^\circ\text{C}</math>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Tous les prétraitements ont réduit le temps de séchage.</li> <li>✓ US + Alcool a nettement réduit le temps de séchage par rapport à d'autres prétraitements.</li> <li>✓ La qualité de l'ail séché a été nettement améliorée par le prétraitement US + Alcool (la teneur en allicine, les caractéristiques de qualité du retrait, de la rugosité de surface, de la saveur, la couleur).</li> </ul>	<p><b>Yabin Feng et al., (2019)</b></p>
<p><b>Prétraitement sous vide couplé à une déshydratation osmotique assistée par ultrasons en tant que nouvelle méthode pour la déshydratation des tranches d'ail</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le prétraitement sous vide (VT) des tranches d'ail a été réalisé dans une fiole Erlenmeyer reliée à une pompe à vide :</li> <li>• Quatre essais DO différents ont été réalisés, à savoir <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ La déshydratation normalement osmotique (NOD), déshydratation osmotique de prétraitement sous vide (VOD): NaCl à 25% (p/p) à <math>35^\circ\text{C}</math> pendant 2 h</li> <li>➢ La déshydratation osmotique assistée par ultrasons (UOD) et prétraitement sous vide couplé à la déshydratation osmotique assistée par ultrasons (VUOD) ; dont les conditions sont : <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Solution osmotique ( NaCl à 25% (p / p)</li> <li>○ Modes ultrasonores de fréquence unique (40 kHz), fréquence de balayage (<math>40 \pm 2</math> kHz), double fréquence (20 + 40 kHz et 40 + 60 kHz) et tri-fréquence (20 + 40 + 60 kHz) et à une densité de puissance de</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Les ultrasons et le vide ont amélioré le transfert de masse pendant la DO des tranches d'ail par rapport aux méthodes NOD, VOD et UOD.</li> <li>✓ La qualité des tranches d'ail déshydratées a été améliorée par VUOD.</li> </ul>	<p><b>Yabin Feng et al., (2019)</b></p>

	<p>50 W / L.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Les durées des impulsions ultrasonores : 10 s allumées et 10s éteintes.</li> <li>○ Les expériences UOD et VUOD ont été réalisées à 35°C pendant 2 h.</li> </ul>		
<p><b>Optimisation des paramètres de processus pour le séchage micro-ondes des gousses d'ail</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le séchage a été fait dans un séchoir micro-onde convectif.</li> <li>• Les expériences de séchage qui ont été réalisées à des températures de l'air de 40, 50, 60 et 70°C, des vitesses d'air de 1,0 et 2,0 m/s et des niveaux de puissance micro-ondes de 10, 20, 30 et 40W.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Le temps de séchage augmentait à mesure que la vitesse de l'air passait de 1,0 à 2,0 m/s à tous les niveaux de température de l'air et de puissance micro-ondes.</li> <li>✓ La puissance micro-ondes de 40 W, la température de l'air de 70°C et la vitesse de l'air de 1,0 m/s ont fourni des gousses d'ail déshydratées de bonne qualité et impliquait une faible consommation d'énergie spécifique dans le processus de séchage.</li> </ul>	<p><b>Sharma et Prasad (2006)</b></p>
<p><b>Séchage des gousses d'ail (<i>Allium sativum</i>) par combinaison micro-ondes-air chaud</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les expériences de séchage ont été réalisées: <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ Séchage micro-ondes-air chaud : 40°C, 50°C, 60°C et 70°C à des vitesses d'air de 1,0 et 2,0 m/s et puissance de 40W.</li> <li>➢ Séchage micro-ondes-air chaud: 60°C et 70°C à des vitesses d'air de 1,0 et 2,0 m/s.</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ La technique de Séchage micro-ondes-air chaud était plus efficace et réduction du temps de séchage environ 91%.</li> <li>✓ Des gousses d'ail séchées de bonne qualité ont également été obtenues par la technique micro-ondes-air chaud.</li> </ul>	<p><b>Sharma et Prasad (2001)</b></p>

<p><b>Cinétique de séchage et qualité des gousses et tranches d'ail déshydratées sous vide</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le séchage a été effectué en utilisant la technique de la micro-onde sous vide, avec une puissance micro-ondes de 240, 480 et 720W, et température de 50°C et 70°C.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ L'abaissement de la teneur en humidité en dessous de 0,6 g/g de matière sèche et l'augmentation de la puissance des micro-ondes ont provoqué une augmentation de la résistance à la compression des gousses d'ail.</li> <li>✓ Le séchage des échantillons d'ail avec le VM a rendu la couleur plus lumineuse.</li> <li>✓ La meilleure rétention des huiles volatiles a été observée pour les tranches d'ail déshydratées aux micro-ondes à 720W.</li> </ul>	<p><b>Adam Figiel (2009)</b></p>
<p><b>Transport d'humidité dans les gousses d'ail soumises à un séchage par convection micro-ondes</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le processus de séchage a été effectué dans un séchoir à micro-onde, en appliquant une puissance micro-onde de l'ordre de 10 à 40 W, une température de l'air comprise entre 40 et 70°C et une vitesse de l'air comprise entre 1,0 et 2,0 m/s</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Le coefficient de transfert de chaleur et de masse pendant le processus de séchage variait de 35,23 à 79,54 W/m<sup>2</sup> C et 4,26 à 6,34 × 10<sup>-2</sup> m/s.</li> <li>✓ La température du produit a augmenté rapidement au début du séchage et est devenue presque stable par la suite.</li> <li>✓ La diffusivité effective de l'humidité, qui variait entre 1,29 à 31,68 × 10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>/s augmentait avec l'augmentation de la puissance micro-onde et diminuait avec l'augmentation de la vitesse de l'air.</li> </ul>	<p><b>Sharma et al. (2009)</b></p>
<p><b>La congélation et la surfusion de l'ail (<i>Allium sativum</i> L.)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Des gousses d'ail, des bulbes d'ail entiers non pelés et des gousses d'ail individuelles non pelées ont été stockés, pendant 1 semaine dans quatre conditions environnementales différentes: ambiante, réfrigérée (1 ± 1°C), surfondue (-6 ± 0,5°C) et congelée (-30 ± 0,5°C), à des vitesses d'air statiques.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Les gousses d'ail peuvent être conservées à des températures bien inférieures à leur point de congélation (-2,7°C) sans congélation.</li> <li>✓ Le point de nucléation ou «température limite métastable» (le point auquel la nucléation des cristaux de glace est initiée) des gousses d'ail pelées se situe entre -7,7 et -14,6°C.</li> </ul>	<p><b>James et al., (2009)</b></p>



# **Partie Expérimentale**

# **Partie Expérimentale**

## **Chapitre 1**

*Caractéristiques physico-chimiques, teneur en polyphénols totale et activité  
Antioxydante d'une variété de l'ail de la région de Skikda (Algérie)*

## Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier les caractéristiques physiques et chimiques des gousses de l'ail (*Allium sativum* L.). Les propriétés technologiques telles que le diamètre, la masse, le nombre des gousses et la longueur, la largeur, l'épaisseur et masse de l'ail entier et de la gousse ont été établies. La matière sèche, les cendres, le pH, la teneur en minéraux et la couleur des gousses d'ail ont été étudiés. En ce qui concerne les composés phénoliques et l'activité antioxydante, ce cultivar a des valeurs élevées.

Cette étude a montré que cette variété de l'ail cultivé dans la région de Skikda présente une qualité appréciable. De plus, ces propriétés physiques sont attribuées au développement des techniques de traitement. Les principaux minéraux de l'ail ont été établis comme K (19066 mg/kg), Mg (836.28 mg/kg), Na (254.2 mg/kg), Ca (249.72 mg/kg) et Fe (71.59 mg/kg).

## 1. Introduction

De nos jours, l'ail a été non seulement largement utilisé pour les propriétés antibactériennes, antivirales, antifongiques et antiprotozoaires. D'un point de vue technologique, l'utilisation de l'ail frais et de ses dérivés a été proposée par de nombreux auteurs en raison de leur activité antioxydant, antimicrobienne, notamment contre le développement d'agents pathogènes et ses effets bénéfiques sur les systèmes cardiovasculaire et immunitaire (Milner, 2010; Omar, 2013; Bayan *et al.*, 2014).

Cependant, l'ail est également riche en vitamines (en particulier les vitamines du complexe B et la vitamine C), en antioxydants et en minéraux (en particulier P, K et Se) (Pekowska et Skupień, 2009). Il l'est également considérée comme une source riche des phytonutriments non volatils, les saponines et les sapogénines, les oxydes d'azote et les amides (Lanzotti *et al.*, 2014 et Martins *et al.*, 2016). En outre, l'ail a des concentrations plus élevées de composés phénoliques que d'autres légumes qui sont régulièrement consommés (Liu *et al.*, 2018).

Dans l'intervalle, les études sur l'ail se sont limitées aux avantages généraux pour la santé tels que les antimicrobiens, les antitumoraux et les antihypertenseurs associés à l'ail. Par conséquent, l'objectif de cette étude est d'établir certaines propriétés physico-chimiques de l'ail cultivé dans la province de Harrouche (Skikda) en Algérie.

## 2. Matériaux et méthodes

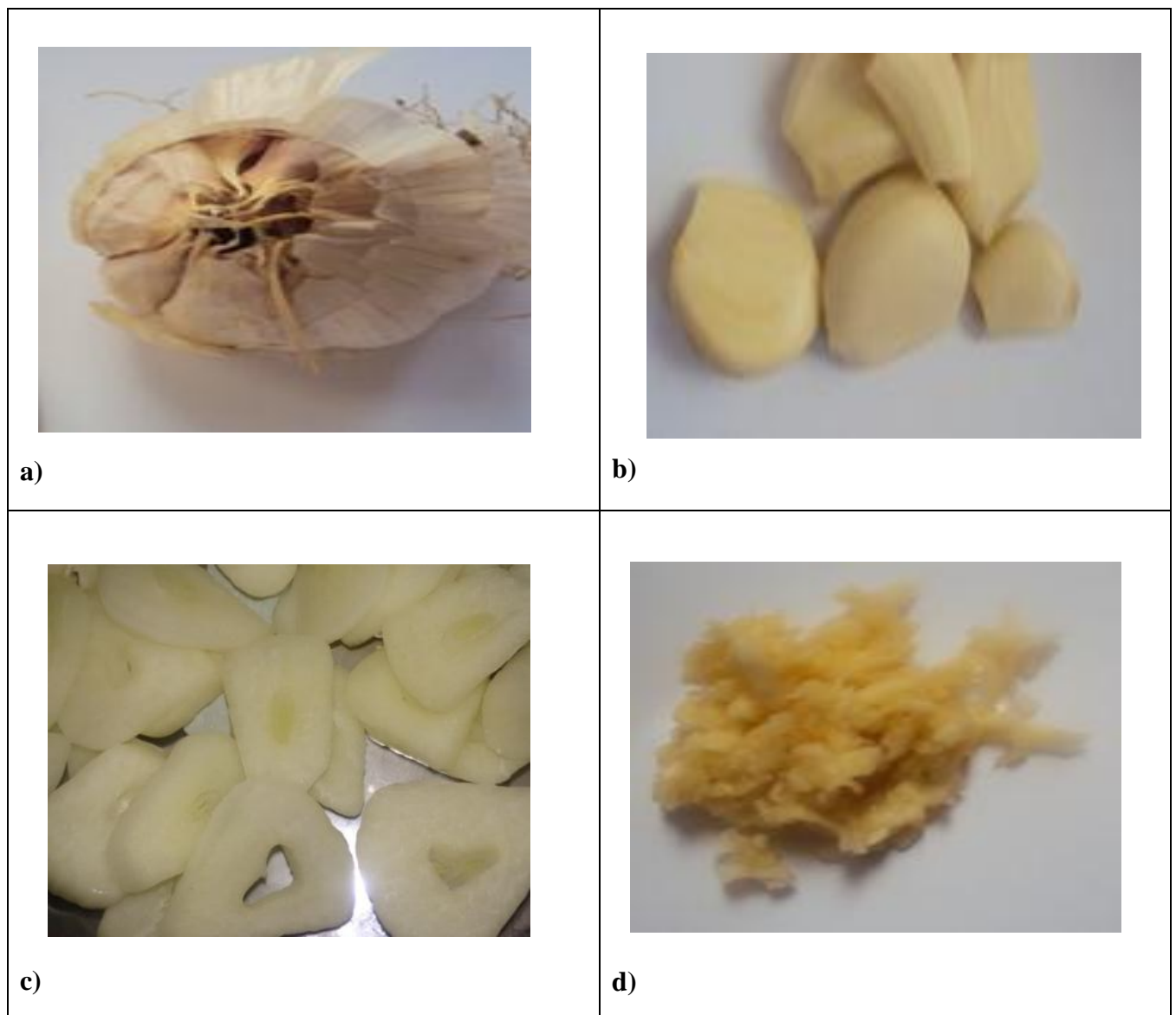
### 2.1. Matériel végétal

L'ail (*Allium sativum* L.) a été récolté à Harrouche, un commune de Skikda, à l'Est de l'Algérie. Cette variété est nommée par « El-Hamra ». La sélection de l'ail de cette région a été basée sur sa qualité et ses caractéristiques intéressantes soit pour la consommation fraîche (couleur attrayante, grande taille, bonne saveur) soit pour l'industrie. Il a récolté durant le mois de juillet. Après la récolte la plante fraîche a été conservée à l'ombre dans un endroit sec et aéré entre des couches de pailles jusqu'à l'utilisation.



## 2.2. Propriétés physiques de l'ail

Les propriétés physiques de l'ail sont réalisées sur 20 bulbes prélevés au hasard, sur les quels sont déterminés les dimensions de l'ail entier (le poids, le diamètre et la longueur) et les dimensions des gousses (la longueur, la largeur, et l'épaisseur). Ces dimensions ont été mesurées au moyen d'un pied à coulisse électronique **Mitutoyo** (modèle CD-15 DC, Angleterre, avec une précision de 0,01 mm). Le poids des bulbes entières et des gousses ont été mesurées à l'aide d'une balance électronique **Sartorius** (modèle BL-600, avec une précision de 0,01g). Ainsi, le dénombrement des gousses d'ail entier a été fait manuellement.



**Figure 16:** Matériel végétal étudié : **a)** les bulbes, **b)** les gousses, **c)** les tranches et **d)** l'ail haché.

Tableau 6: Caractéristiques générales de l'ail.

Légume	Ail
Espèce	<i>Allium sativum</i>
Variété	El-Hamra Elharouch
Lieu de culture	Skikda
Durée de culture	9 mois
Période de culture	Juin au fin Juillet
Stade de récolte	Maturité
Couleur	Blanc ivoire, enveloppe rose

### 2.3. Détermination de la couleur

La couleur de l'aliment a un impact important dans l'acte d'achat et la perception organoleptique. C'est un critère objectif de qualité car elle varie avec le niveau de maturité des fruits et légumes et peut être un indicateur de l'état de fraîcheur ou d'altération de l'aliment (Jeant *et al.*, 2006).

Les attributs de couleur de bulbe d'ail et les gousses ont été mesurés avec un colorimètre (modèle CR300-X, Minolta, Japon). La couleur a été évaluée selon la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) et exprimée en  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ .  $L^*$  indique la légèreté (noir = 0, blanc = 100),  $a^*$  (rougeur > 0, verdure < 0), et  $b^*$  (jaunissement,  $b^*$  > 0, bleu < 0) ont été enregistrés. Les répétitions ont été effectuées cinq fois.

### 2.4. Propriétés chimiques

#### 2.4.1. Teneur en eau et pH

La teneur en eau a été mesurée en utilisant une méthode AOAC. La dessiccation 5g de l'ail est obtenue à la température de  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  pendant 24 heures dans une étuve iso-thermique et ventilée (Memmert), jusqu'à une mesure pratiquement constante du poids (AOAC, 2000).

La détermination de la teneur en cendres a été faite par l'incinération d'une prise d'essai dans un four à moufle (Hobersal, Barcelone, Espagne; Modèle 12 PR/300 série 8B), à une température de  $550 \pm 5^\circ\text{C}$  jusqu'à combustion complète de la matière organique et pesée des résidus qui reste.

Le pH a été déterminé en utilisant la méthode décrite par ISO; 1842 (ISO, 1991). 10g de l'ail broyé a été homogénéisé avec l'eau distillée à un rapport de 1:10 (échantillon: eau). Ensuite, le pH a été mesuré en utilisant une électrode combinée (877 Titrino plus, analyses d'ions Metrohm CH9101, Herisau, Suisse) jusqu'à la stabilisation du pH. La mesure a été effectuée à température  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ . Les analyses ont été effectuées en cinq répétitions.

### 2.4.2. Dosage des polyphénols

#### a) Extraction des polyphénols

La méthode décrite par ISO; 14502-1 est utilisée (ISO, 2005):

- Brièvement,  $0,200 \pm 0,001$ g de chaque échantillon a été pesé dans le tube, et 5ml de méthanol à 70% et à 70°C a été ajouté.
- L'ex-tube a été mélangé et chauffé à 70°C pendant 10 min.
- Après refroidissement à la température ambiante, l'extrait a été centrifugé à 7840 tours pendant 10 min (Centrifugeuse Sigma 4-5L, Allemagne).
- Le surnageant a été décanté dans une conique gradué.
- L'étape d'extraction a été répétée trois fois.
- Les deux extraits ont été rassemblées et le volume ajusté à 10ml avec 70% de méthanol froid.
- Un millilitre de l'extrait a été dilué avec de l'eau jusqu'à 5mL (eau d'ionisée).

#### b) Détermination des polyphénols totaux

- La teneur en polyphénols totaux (TPC) a été déterminée par spectro-photométrie (Shimadzu, UV 1800, Japan), en utilisant de l'acide gallique comme une norme, selon la méthode décrite par (ISO) 14502-1 (ISO, 2005).
- En bref; 1,0 ml de l'extrait de l'échantillon dilué a été ajouté au tube contenant 5,0 ml d'une dilution 1/10 du réactif de Folin-Ciocalteu dans l'eau.
- Ensuite, 4,0 ml d'une solution auto-bonate de sodium (carbonate de sodium) (7,5%, p/v) ont été ajoutés.
- Les tubes ont ensuite été laissés au repos à température ambiante pendant 60 min avant de l'absorbance à 765 nm a été mesuré par rapport à l'eau.
- Toutes les valeurs sont exprimées en équivalents mg d'acide gallique (GAE) par 100g de matière sèche de l'échantillon de l'ail.

### 2.4.3. Mesure d'activité antioxydante

#### a) Dosage de piégeage des radicaux DPPH

L'activité de piégeage des radicaux libres de l'échantillon de l'ail a été mesurée par l'intermédiaire du 1,1-diphényl-2-picryl-hydrazil (DPPH). Le dosage de piégeage des radicaux est utilisé selon la méthode de Blois (1958) avec quelques modifications.

- En bref, on a préparé une solution de 1 mmol de DPPH dans l'éthanol et 2ml de cette solution a ajouté à 2 ml de l'extrait d'échantillon d'ail aux différentes concentrations dans l'eau distillée.

- Les mélanges ont été agités vigoureusement et ont été ensuite laissés au repos à la température ambiante pendant 30 min.
- Leur absorbance a été mesurée à 517 nm en utilisant un spectrophotomètre (Shimadzu, UV 1800, Japan).
- La solution de DPPH qui ne contient pas un échantillon d'ail a été utilisée comme témoin (Bae et al., 2014).
- Le Trolox a été utilisé pour établir la courbe d'étalonnage et les résultats ont été exprimés en mg de Trolox par g matière sèche de l'échantillon de l'ail.

### 2.5. Concentration en éléments minéraux

La méthode d'extraction des sels minéraux a été mise au point au laboratoire de vétérinaire (Institut des Sciences vétérinaires et Sciences Agronomiques) à partir des méthodes de références (BIPEA, 1976; AOAC, 2000 et 2003). Elle comprenait les étapes d'incinération, de dissolution et de filtration.

L'ail (0,5g) a été amenée dans un four à moufle (Hobersal, Barcelone, Espagne; modèle 12 PR/300 série 8B) et digérée à 550°C pendant 5h. 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 ionisée de très haute pureté. Les échantillons ont été conservés à 4°C jusqu'à l'analyse.

La détermination de Ca, Mg, Cu, Fe, Mn et Zn dans les 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 ont été utilisées pour la quantification des minéraux, avec une plage de concentration comprise entre 0 et 10,0 mg L<sup>-1</sup> pour Ca, Mg, K et Na et entre 0 et 2,0 mg L<sup>-1</sup> pour Fe, Cu, Mn et Zn. Elles ont montré une bonne linéarité ( $r^2 \geq 0,997$ ). Les analyses ont été effectuées en cinq répétitions (n =5) et les résultats ont été exprimés en mg/kg.

### 2.6. Analyses statistiques

L'analyse de la variance (ANOVA) a été effectuée en utilisant la procédure des modèles linéaires généraux (GLM) fournie dans la version logicielle 11.0 (2008) de SigmaPlot\SPW11. Les expériences ont été effectuées en triple et les moyennes des trois ensembles de données sont indiquées. Les moyennes étaient séparées par les différences les moins importantes selon les multiples plages de Duncan.

### 3. Résultats et discussion

#### 3.1. Propriétés Biométriques

Cette étude est intéressante de point de vue qu'elle définit les caractéristiques commerciales et l'homogénéité de la matière première qui sont fortement recommandés.

Le diamètre, la longueur, le poids et le nombre de gousses des bulbes d'ail, ainsi que la longueur, la largeur, l'épaisseur, la masse, des gousses d'ail sont indiqués dans le tableau 7.

**Tableau 7:** Caractéristiques morphologiques de l'ail.

	Paramètres	Valeur moyenne
<b>Bulbe</b>	Poids de bulbe entier (g)	25.32 - 38.03
	Longueur (mm)	35.17 - 39.08
	Diamètre (mm)	44.17 - 48.53
	Nombre de gousses d'un bulbe	12 - 14
<b>Gousse</b>	Poids de gousse (g)	1.69 - 7.18
	Longueur (mm)	20.48 - 30.21
	largeur (mm)	10 - 25
	Epaisseur	10 - 25

L'ail avait un diamètre compris entre 44 et 48 mm, une longueur comprise entre 35.17 - 39.08, une masse comprise entre 25 et 38g et nombre des gousses est compris entre 12 et 14.

De plus, les gousses d'ail avaient entre 20 et 30mm de longueur, entre 10 et 25mm de largeur, entre 5 et 12 mm d'épaisseur et entre 1 et 7g de masse.

Dans l'étude faite par **Haciseferoğulları et al., (2005)**; 94% de l'ail avait un diamètre compris entre 40 et 55 mm, 86% de l'ail avait une masse comprise entre 25 et 50 g et 88% avait des nombre de gousse compris entre 15 et 23. De plus, 91% des gousses d'ail avaient entre 20 et 30 mm de longueur, 88% d'entre elles avaient entre 10 et 25mm de largeur, 92% d'entre elles avaient entre 5 et 12 mm d'épaisseur et 91% d'entre elles avaient entre 1 et 5g de masse.

Ces différences entre le poids et les dimensions d'ail sont dues à la variété, aux facteurs climatiques et aux techniques culturales appliquées.

#### 3.2. Couleur

La couleur joue un rôle important dans l'évaluation de la qualité d'un aliment (**Nout et al., 2003**). Les valeurs de l'espace couleur CIELAB sont illustrées dans le tableau 8 et la figure 21. Ces résultats montrent que la gousse épluchée, la pelure de bulbe et celle de gousse présentant un profil de couleur différent exprimé par les composants  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $L^*$ , chromacité et Hue (angle de teinte). Cela signifie que les pigments présents dans les trois parties sont différents.

Tableau 8: Profil de couleur des différentes parties de l'ail.

AIL	$a^*$	$b^*$	$L^*$	C	$H^\circ$
<b>Bulbe entier</b>	$01.75 \pm 0.63$	$26.45 \pm 0.63$	$72.55 \pm 4.31$	$32.15 \pm 7.28$	$86.70 \pm 1.83$
<b>Gousse entier</b>	$13.56 \pm 0.41$	$26.80 \pm 1.19$	$60.46 \pm 1.19$	$30.00 \pm 0.91$	$63.13 \pm 1.02$
<b>Gousse épluché</b>	$-03.4 \pm 0.40$	$23.86 \pm 0.76$	$70.70 \pm 3.50$	$24.10 \pm 0.81$	$98.26 \pm 0.70$

Les résultats permettent de positionner les trois parties d'ail sur le cercle chromatique et sur le diagramme de chromacité et de clarté (figure 17).

D'après les figures 17 et 18, les trois parties d'ail présentent un profil de couleur différent selon les valeurs  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $L^*$  et  $C^*$ :

- La couleur de pelure de bulbe d'ail étudié est blanc pal
- La couleur de pelure de la gousse est rose pâle
- La couleur de la gousse épluchée est blanc crème.

Sur la base de la légèreté, les résultats indiquent que le bulbe et la gousse ont une couleur claire. Les indices ( $a^*$ ) et ( $b^*$ ) qui indiquent respectivement le vert et le jaune ont montré des différences significatives ( $P \leq 0,001$ ) entre les gousses et le bulbe. Les gousses avaient la valeur de la couleur verte la plus élevée.

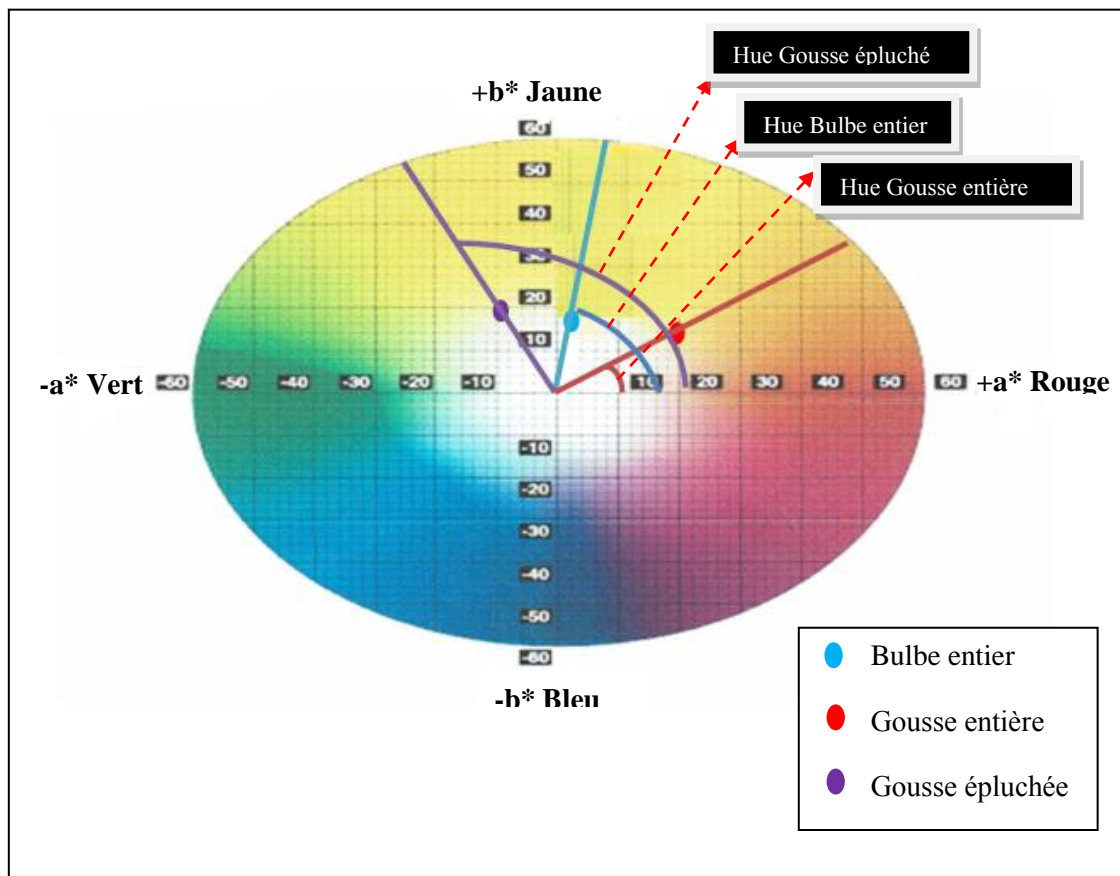


Figure 17: Positionnement de différentes parties de l'ail sur le cercle chromatique.

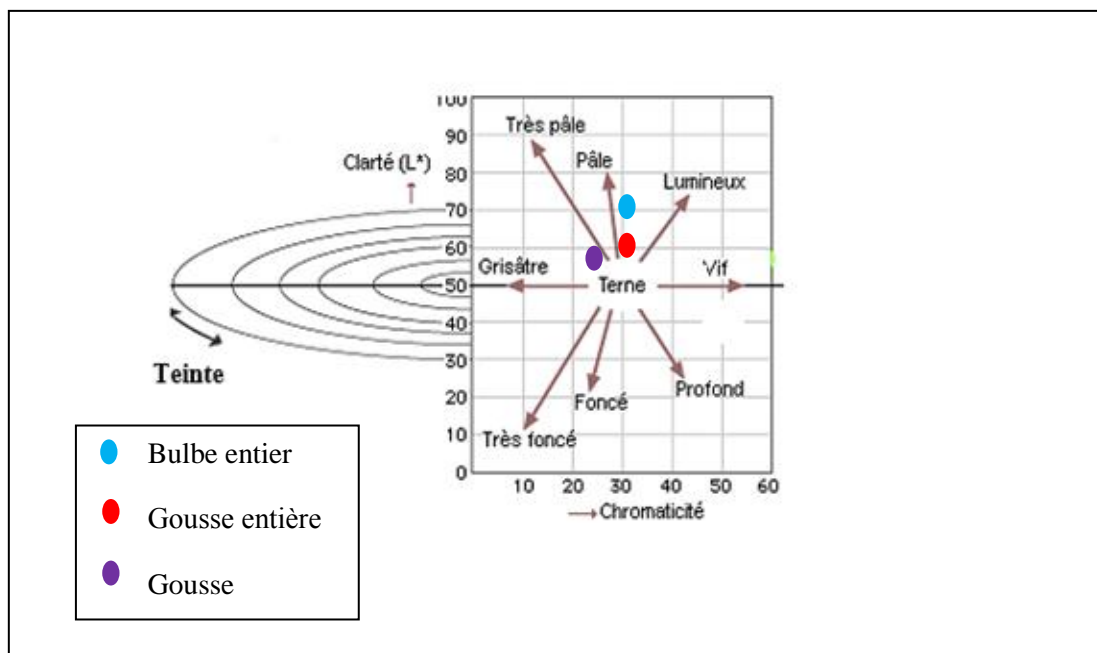


Figure 18: Diagramme de chromacité et clarté des différentes parties de l'ail.

### 3.3. Propriétés chimiques

Tableau 9: Caractéristiques chimiques de l'ail frais.

Paramètres	Valeur moyenne
Teneur en eau (%)	63.15 ± 0.010
Matière sèche (%)	33.85 ± 0.010
Cendres (%)	01.98 ± 0.005
pH	06.06 ± 0.005
Polyphénols totaux (mg EAG/100g)	975.02 ± 0.05
Activité antioxydant (mg Tolorox/ g MS)	1.98 ± 0.001

La teneur en eau permet d'une part d'exprimer les résultats de la matière sèche par rapport au poids total et d'autre part d'exprimer les résultats des constituants biochimiques par rapport à la matière sèche. D'après le résultat obtenu, l'ail présente une teneur en eau plus ou moins importante 63.15%. Cette valeur est comparable à celle citée par **Hacisefeoğulları et al., (2005)**; qui est de 66.32% est supérieure à celle signalée par **Suleria et al., (2015)**; qui est de 53.6%.

Le pH de l'ail étudié est de 6.06. Par comparaison avec des variétés étrangères, ce résultat est presque identique à celui donné par **Suleria et al., (2015)**; qui est de 6.05, **Toledano-Medina et al., (2016)**; qui est 6,31 et **Bae et al., (2014)**; qui est 6.41.

La teneur en cendre présente la quantité totale en sels minéraux présents dans l'échantillon analysé. Elle est exprimée en (%) de la matière sèche. D'après le tableau 9, le taux des cendres est de 1.98%. Ce taux est inférieur à celui cité par **Hacisefeoğulları et al., (2005)** et **Suleria et al., (2015)**; qui est de 2.30%.

### 3.4. Teneur en polyphénols totaux

Les composés phénoliques sont connus comme des antioxydants répandus dans les légumes communs. Ils possèdent diverses propriétés biologiques, telles que la réduction du risque de maladies cardiovasculaires, la résistance au VIH et l'activité antimicrobienne (**Liu et al., 2018**).

Les mesures de la teneur phénolique totale sont indiquées dans tableau 9. Les résultats sont présentés en équivalents d'acide gallique en mg par 100g matière sèche.

La teneur en TPC de génotype étudié était similaire à celle de **Beato et al., (2011)**; (3,4-10,8 mg GAE/ g MS), **FeiMeng LI et al., (2015)**; (839,96 ± 31,38 µg/g MS) et **Spyridon Petropoulos et al., (2018)**; (8,59 et 44,85 mg GAE/g MS ou 277-1462 mg GAE/100g MS). Elle est inférieure à celle rapportée par **Chen et al., (2013)**; (17,16-42,53 mg GAE/g MS), et **Nagella et al., (2014)**; qui ont évalué divers ails collectés dans différentes régions de Corée. Ils ont rapporté des valeurs de TPC dans la fourchette est à celle supérieure de notre étude (33,50 - 49,89 mg GAE/ g MS).

La variation du contenu en TPC entre le génotype de cette étude et des autres génotypes pourrait être attribuée à l'effet du génotype, des conditions microclimatiques et de pratiques culturelles entre les régions. Ces différences peuvent être dues aux variations de la procédure, au solvant d'extraction et les conditions utilisées (**Spyridon Petropoulos et al., 2018**).

De plus, **Beato et al., (2011)**; ont évalué les mêmes cultivars d'ail à quatre endroits différents et ont confirmé l'effet significatif des conditions de croissance sur la teneur totale en composés phénoliques.

**Hirata et al., (2015)**; ont évalué 103 clones d'ail collectés dans diverses régions du monde en ce qui concerne leur teneur en sulfoxyde de S-allyl-cystéine et les composés phénoliques totaux, et ils ont signalé une variation significative qui pourrait être attribuée à l'adaptation de l'espèce dans diverses conditions de croissance lors de la diffusion de l'espèce à travers le monde.

En revanche, **Beato et al., (2011)**; ont évalué la teneur totale en composés phénoliques dans les ails blancs et violets et, bien qu'ils aient trouvé une teneur plus élevée en composés phénoliques totaux dans le blanc par rapport aux ails de couleur violette. Ces différences n'étaient pas significatives. Cela indique une interaction entre génotype et environnement.

L'ail a des concentrations élevées de composés phénoliques que d'autres légumes qui sont régulièrement consommés. Par conséquent, l'ail est recommandé comme source particulièrement riche de composés phénoliques alimentaires (**Liu et al., 2018**; **Spyridon Petropoulos et al., 2018**).

### 3.5. Activité antioxydante

Bien que la plupart des activités antioxydantes d'origine végétale soient dérivées de composés de type phénolique (**Cai et al., 2004**). L'activité antioxydant a été évaluée comme la capacité d'élimination des radicaux libres. Le radical DPPH est l'un des substrats les plus couramment utilisés



pour une évaluation rapide de l'activité antioxydante en raison de sa stabilité (sous forme radicalaire) et de la simplicité du test.

Le résultat de l'activité antioxydante mesuré par la méthode DPPH est mentionné dans le tableau 9. D'un point de vue quantitatif, il est difficile de comparer nos résultats avec ceux rapportés précédemment. La quantification de l'activité antioxydante dans autres espèces d'*Allium* ont montré des différences qui semblent dépendre des espèces/cultivars ou variétés végétales, des variations de la procédure et solvant d'extraction ; et les conditions utilisées (**Dziri et al., 2012**).

De plus, **Chen et al., (2013)**; ont étudié 43 cultivars d'ail pour leurs composés phénoliques (teneurs totales en phénoliques et flavonoïdes) et leur activité antioxydante grâce à divers essais de DPPH (2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl), HRSC (capacité de piégeage des radicaux hydroxyles), FRAP (pouvoir antioxydant réducteur d'ions), CUPRAC (capacité antioxydante réductrice des ions cuivriques) et MCA (activité chélatrice des métaux). Les auteurs ont signalé une variation significative entre les cultivars testés.

Cependant, il existe une corrélation positive entre la teneur totale en phénoliques et l'activité antioxydante, comme déterminé par le test DPPH. La forte corrélation entre la teneur totale en phénoliques et l'activité antioxydante a également été confirmée par **Chen et al., (2013)**. Ils ont testé cinq dosages différents et **Kyung (2012)** qui a évalué 19 cultivars d'ail. Ils ont observé des résultats similaires.

### 3.6. Concentration des minéraux

Les concentrations moyennes des éléments analysés observées dans l'ail sont indiquées dans le tableau 10. Les principaux minéraux de l'ail ont été établis comme K (19066 mg/kg), Mg (836.28 mg/kg), Na (254.2 mg/kg), Ca (249.72 mg/kg) et Fe (71.59 mg/kg). Les minéraux les plus abondants étaient le K suivis de Na, Ca, Mg et Fe. D'autres ont été déterminés à des niveaux mineurs. Ces valeurs étaient similaires aux valeurs rapportées par **Hacisferogullari et al., (2005)**.

**Tableau 10:** Teneur en minéraux (mg/kg) dans les tranches de l'ail.

Elément	Mn	Mg	Ca	Zn	Cu	Fe	K	Na
	30.7	836.28	249.72	24.7	39.2	71.59	19066	254.2

En conséquence, les minéraux sont considérés comme élément important en raison de leur importance nutritive, physiologique et technologique. Cette étude tente également à contribuer à la connaissance des propriétés nutritionnelles de l'ail. De plus, la connaissance du contenu minéral, dans les légumes, est d'un grand intérêt.

**Conclusion**

Cette étude a montré que la variété de l'ail cultivé dans la région de Skikda présente une qualité appréciable. Cette variété a montré une activité antioxydante et une teneur en polyphénols totaux élevée.

La connaissance des différences spécifiques dans les propriétés physico-chimiques entre les différents types d'ail peut être d'une valeur potentielle pour les agriculteurs, car ils peuvent sélectionner la meilleure variété d'ail qui présente des avantages utiles pour la santé. De plus, ces propriétés physiques sont attribuées au développement des techniques de traitement. Les principaux minéraux de l'ail ont été établis comme K (19066 mg/kg), Mg (836.28 mg/kg), Na (254.2 mg/kg), Ca (249.72 mg/kg) et Fe (71.59 mg/kg).

# **Partie Expérimentale**

## **Chapitre 2**

## *Etude comparative du séchage convectif et du séchage par microonde assisté à l'air chaud des tranches de l'ail*

### Résumé

Les tranches d'ail ont été déshydratées par séchage convectif (SC) et par séchage par micro-ondes assisté à l'air chaud (SMAC). Les caractéristiques du séchage et la qualité des tranches de l'ail séchées en termes de teneur en polyphénols totaux, l'activité antioxydante, la couleur et la texture ont été étudiées. Le séchage par SC et par SMAC a été effectué aux des températures de 50, 60 et 70°C. Afin de déterminer les paramètres cinétiques, les données expérimentales de séchage ont été ajustées aux divers modèles semi-empiriques.

Parmi eux, Two-term, Henderson and Pabis, et Midilli et *al.* (2002) ont donné un meilleur ajustement pour les deux méthodes du séchage (SC et SMAC). Le séchage SMAC a significativement réduit le temps de séchage de 630 min à 53 min. La diffusivité efficace de l'humidité, varie de  $3.24 \times 10^{-9}$  à  $7.39 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s et de  $1.68 \times 10^{-8}$  à  $3.77 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s, pour séchage SC et SMAC respectivement.

L'énergie d'activation est de 40.56 kJ/mol pour le séchage à l'air chaud et de 33,63 KJ/mol pour le séchage aux micro-ondes en utilisant une équation de type Arrhenius.

Le séchage de l'ail par de SMAC a donné des tranches avec une légèreté élevée  $L^*$  par rapport au séchage SC. Ceci se caractérise par une teneur élevée en polyphénols totaux 335.75mg GAE/100g MS et une capacité antioxydant élevée (0.68 mg Trolox/g MS).

En conclusion, la technique de séchage SMAC peut être utilisée pour le traitement des tranches de l'ail avec une haute qualité et des valeurs nutritionnelles élevées, ainsi que de faibles coûts d'exploitation.

### 1. Introduction

Habituellement, l'ail est consommé frais, mais ces dernières années, les tranches d'ail séchées et la poudre sont très demandées pour diverses applications. Par conséquent, les tranches et la poudre séchées sont devenues les produits commerciaux à base d'ail les plus populaires.

Il est utilisé pour les épices dans les aliments en raison de sa saveur piquante typique. Il a également été préféré dans les aliments précuits et les aliments instantanés tels que les craquelins aromatisés, les croustilles, les soupes, les sauces, la mayonnaise et la sauce ketchup aux tomates, la vinaigrette, les saucisses à la viande, les ragoûts, les spaghettis, les chutney et les cornichons afin de donner une saveur désirable (İlter et *al.*, 2018).

À cette fin, l'utilisation de traitements technologiques spécifiques tels que le séchage est nécessaire afin de préserver l'ail, augmenter sa durée de vie et le rendre disponible le long de l'année (Fante et Noreña, 2013).

La technique de séchage est l'une des plus anciennes méthodes de conservation des aliments (Afolabi, 2014). Elle présente la méthode de conservation la moins coûteuse que de nombreuses autres opérations, nécessitant moins d'équipement, moins de frais de stockage et de transport (Bozkir et *al.*, 2019). Plusieurs techniques de séchage telles que l'air, le sous vide, la pulvérisation et la lyophilisation sont utilisées. Le séchage à l'air par convection est la technique la plus courante utilisée pour la production de légumes déshydratés (Thuwapanichayanan et *al.*, 2014; Bozkir et *al.*, 2019).

Cependant, les principaux inconvénients du séchage à l'air chaud est augmenté le temps du séchage, réduits les caractéristiques sensorielles et la valeur nutritionnelle du produit final et du durcissement (**İlter et al., 2018**).

Par contre, le séchage par micro-ondes est devenu populaire, il permet de réaliser d'importantes économies d'énergie avec une diminution du temps de séchage (**Horuz et al., 2017**). Cependant, les micro-ondes sont rarement utilisées seules, mais plutôt en combinaison avec des méthodes convectives ou d'autres méthodes conventionnelles. L'effet de la combinaison est synergique. Dans la méthode du séchage par convection aux micro-ondes, l'air forcé est fourni pour évacuer la vapeur d'eau, entraînée de l'intérieur des aliments vers sa surface. Ceci est dû au chauffage interne rapide. Pour éviter la condensation de l'humidité entraînée à la surface des aliments, il est nécessaire de chauffer l'air pour augmenter sa capacité de transport d'humidité (**Sharma et al., 2009**).

Des travaux publiés dans le domaine du séchage par micro-ondes ont montré que cette technique entraîne une réduction plus importante du temps de séchage, augmentant la capacité de production. Cela est dû à l'efficacité thermique élevée du processus. Le bon contrôle des paramètres de séchage tels que le niveau de puissance des micro-ondes, le débit d'air et la température de l'air a abouti à un produit séché avec des attributs de qualité élevés (**Sharma et al., 2009**).

Des modèles mathématiques des processus de séchage sont utilisés pour concevoir de nouveaux systèmes du séchage, améliorer les systèmes existants ou même pour contrôler le processus de séchage. Plusieurs modèles de séchage en couche mince sont disponibles dans la littérature pour expliquer les caractéristiques de séchage des produits agricoles. Divers chercheurs ont entrepris de nombreuses études couvrant la modélisation mathématique et la cinétique de certains processus de séchage des légumes.

Il existe de nombreuses études liées à l'ail séché utilisant différentes techniques telles que le micro-ondes sous vide, l'air chaud, les micro-ondes, l'infrarouge, la lyophilisation, mais principalement l'effet de la température et de l'épaisseur des tranches ont été discutés (**Condori et al., 2001; Baysal et al., 2003; Cui et al., 2003; Ertekin et Yaldiz, 2004; Sacilik et Unal, 2005; Sablani et al., 2007; Figiel, 2009**).

Par conséquent, l'objectif de ce travail était:

- D'étudier l'effet des méthodes de séchage, à savoir le séchage SC et le séchage SMAC, sur les caractéristiques de séchage.
- D'évaluer l'effet de différentes techniques de séchage sur les caractéristiques de qualité qui ont le plus influencé sur l'acceptation du consommateur, principalement la couleur et la texture.

## 2. Matériels et méthodes

### 2.1. Matière végétale

L'ail (*Allium sativum* L., El-Hamra) a été récolté à Harrouche, un village de Skikda, province, à l'est de l'Algérie. Les bulbes d'ail ont été stockés dans un endroit sec à température ambiante (20°C) jusqu'à l'utilisation. Les bulbes ont été séparés en gousses, pelés puis tranchés en morceaux uniformes de 2 mm d'épaisseur. La teneur en humidité des échantillons a été déterminée par séchage dans une étuve à vide (Binder DV53, Francfort, Allemagne) à 70°C pendant 24h selon la méthode de l'Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 2010). La teneur en humidité initiale des échantillons d'ail était de  $63 \pm 0,5\%$  (w/b).

### 2.2. Séchage à l'air chaud

L'expérience de séchage par convection a été réalisée dans une étuve de séchage conventionnelle (modèle MEMMERT UF750, Allemagne). L'expérience a été effectuée aux différentes températures 50, 60 et 70°C et à un débit d'air de 2 m/s. La perte du poids de l'échantillon pendant le séchage a été mesuré à des intervalles de 10 minutes. Le processus de séchage a été arrêté lorsque la teneur en humidité était d'environ  $12 \pm 0,2\%$ . Les tranches d'ail séchées ont ensuite été transférées en sachets de polyéthylène sous vide après refroidissement.

### 2.3. Séchage au microonde assisté à l'air chaud

Le séchage des tranches de l'ail a été effectué par microonde assisté à l'air chaud (figure 23) (système développé par le laboratoire d'ingénierie post-récolte, Département d'ingénierie Bioressource, Université McGill, Canada).

Le générateur de micro-onde fonctionne à 2450 MHz et la puissance peut varier de 0 à 100W. Deux détecteurs à cristal Hewlett Packard (modèle 420A, Californie, États-Unis) surveillent et reflètent la puissance micro-ondes incidente, et un capteur de température à fibre optique (Nortech EMI-TS (Québec, Canada) pour surveiller les températures des échantillons ont été utilisés pour cette expérience.

Un échantillon de 60g a été utilisé dans chaque expérience du séchage, étalé en une seule couche et placé à l'intérieur de la cavité micro-onde. Le séchage a été effectué aux différentes températures 50, 60 et 70°C et une puissance micro-ondes de 100W. Pour éviter la surchauffe des tranches, le conteneur tourne à chaque fois et un ventilateur électrique a été installé au bas du séchoir pour produire un courant d'air. La température des échantillons a été surveillée par le capteur de température à fibre optique et la masse de l'échantillon a été enregistrée par l'ordinateur via un système d'acquisition de données (Hewlett-Packard, USA).

Le séchage a été arrêté lorsque l'échantillon a atteint un poids correspondant à une teneur en humidité d'environ 12%. Après refroidissement, Les tranches d'ail séchées ont été transférées en sachets de polyéthylène sous vide.

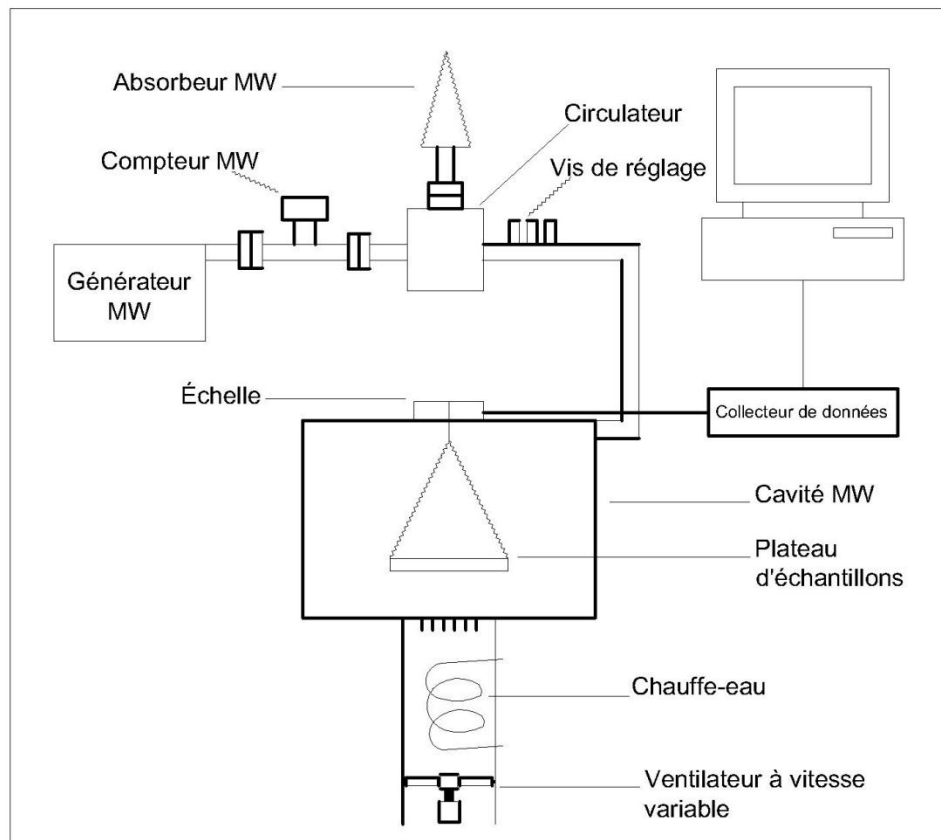


Figure 19: Schéma du microonde assisté à air chaud.

## 2.4. Modélisation mathématique du séchage

### 2.4.1. Cinétique de séchage

Le taux d'humidité (MR) des tranches d'ail a été calculé en utilisant l'équation (1):

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_t} \quad (1)$$

Où «  $M_t$  » est la teneur en eau au moment (t), «  $M_0$  » est la teneur en humidité initiale et «  $M_e$  » est la teneur en humidité d'équilibre (le tout en kg d'eau par kg de matière sèche).

Différents modèles ont été testés comme prédicteurs de la cinétique du séchage de l'ail (tableau 11). Une 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 aux équations du modèle sélectionnées. Une analyse statistique a été utilisée pour évaluer l'ajustement des données expérimentales aux modèles en utilisant  $R^2$  (coefficient de détermination), une réduction du chi carré ( $\chi^2$ ) et une erreur quadratique moyenne (RMSE).

Ces paramètres ont été calculés à l'aide des équations ci-dessous:

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{ei} - MR_{pi})^2} \quad (3)$$

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 le modèle.

#### 2.4.2. Détermination de diffusivité effective

La deuxième loi de Fick a été utilisée pour déterminer le coefficient de diffusivité selon la méthode de **Sacilik (2007)**.

$$\frac{\delta M}{\delta t} = D_{eff} \nabla^2 M \quad (4)$$

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} t\right) \quad (5)$$

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} t \quad (6)$$

Où «  $D_{eff}$  » est la diffusivité effective en ( $m^2/s$ ), «  $MR$  » est le taux d'humidité (kg d'eau par kg de matière sèche) au temps  $t$  et «  $L$  » est la demi épaisseur d'échantillon (m).

**Tableau 11:** Modèles mathématiques utilisés pour décrire la courbe du séchage des tranches de l'ail en couche mince.

No.	Nom de modèle	Equation	Référence
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$	Bruce (1985)
2	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Hashim et al., (2014)
3	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	Togrul et Pehlivan (2002)
4	Two-term	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(k_1t)$	Sacilik (2007)
5	Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Midilli et al., (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)



### 2.4.3. Énergie d'activation

La dépendance de la diffusivité à la température d'humidité effective est décrite par l'équation d'Arrhenius (Equation 7):

$$D_{eff} = D_0 e^{\frac{E_a}{R(T+273.15)}} \quad (7)$$

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

### 2.5. Détermination de couleur

La couleur d'un produit alimentaire est l'un des facteurs de qualité les plus importants. Le changement de couleur dans les échantillons a été déterminé à l'aide d'un chromomètre (MINOLTA CR-300X, Japon) en termes de  $L^*$  (blancheur/obscurité),  $a^*$  (rougeur/verdure),  $b^*$  (jaunissement/bleuissement) et la différence de couleur ( $\Delta E$ ). La couleur mesurée a été exprimée par la valeur du changement de couleur total ( $\Delta E$ ) selon l'équation (8):

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2} \quad (8)$$

«  $\Delta E$  » indique le degré de changement de couleur global d'un échantillon frais par rapport aux valeurs de couleur d'un échantillon séché.

### 2.6. Détermination de la texture

Pour évaluer la texture des tranches d'ail, des tests de découpe ont été effectués à l'aide d'un analyseur de texture (Instron-4502, États-Unis). Il est équipé d'une force 50N et d'une sonde cylindrique d'un diamètre de 3,4 mm. La sonde était alignée sur le centre d'une tranche d'ail séchée et au trou (diamètre 6 mm) sur la plate-forme. La vitesse de la tête transversale de la sonde a été réglée à 10 mm/min. Le processus de test a été contrôlé et les données ont été collectées à l'aide du logiciel informatique (Instron série IX, version 8.25). La force maximale a été enregistrée et analysée.

### 2.7. Dosage des polyphénols

#### 2.7.1. Extraction de polyphénols

La méthode décrite par ISO; 14502-1 est utilisée (ISO, 2005).

- Brièvement,  $0,200 \pm 0,001g$  de chaque échantillon a été pesé dans le tube, et 5ml de méthanol à 70% et à  $70^{\circ}C$  a été ajouté.
- L'ex-tube a été mélangé et chauffé à  $70^{\circ}C$  pendant 10 min.
- Après refroidissement à la température ambiante, l'extrait a été centrifugé à 7840 tours pendant 10 min (Sigma 4-5L, Allemagne).
- Le surnageant a été décanté dans une conique gradué.

- L'étape d'extraction a été répétée trois fois.
- Les deux extraits ont été rassemblés et le volume ajusté à 10ml avec 70% de méthanol froid.
- Un millilitre de l'extrait a été dilué avec de l'eau jusqu'à 5mL (eau d'ionisée).

### 2.7.2. Détermination des polyphénols totaux

- La teneur en polyphénols totaux (TPC) a été déterminée par spectro-photométrie (Shimadzu, UV 1800, Japan), en utilisant de l'acide gallique comme une norme, selon la méthode décrite par (ISO) 14502-1 (**ISO, 2005**).
- En bref; 1,0 ml de l'extrait de l'échantillon dilué a été ajouté au tube contenant 5,0 ml d'une dilution 1/10 du réactif de Folin-Ciocalteu dans l'eau.
- Ensuite, 4,0 ml d'une solution auto-bonate de sodium (carbonate de sodium) (7,5%, p/v) ont été ajoutés.
- Les tubes ont ensuite été laissés au repos à température ambiante pendant 60 min avant de l'absorbance à 765 nm a été mesuré par rapport à l'eau.
- Toutes les valeurs sont exprimées en équivalents mg d'acide gallique (GAE) par 100g de matière sèche de l'échantillon de l'ail

## 2.8. Mesure d'activité antioxydante

### 2.8.1. Dosage de piégeage des radicaux DPPH

L'activité de piégeage des radicaux libres de l'échantillon de l'ail a été mesurée par l'intermédiaire du 1,1-diphényl-2-picryl-hydrazil (DPPH). Le dosage de piégeage des radicaux est utilisé selon la méthode de Blois (1958) avec quelques modifications.

- En bref, on a préparé une solution de 1 mmol de DPPH dans l'éthanol et 2ml de cette solution a ajouté à 2 ml de l'extrait d'échantillon d'ail aux différentes concentrations dans l'eau distillée.
- Les mélanges ont été agités vigoureusement et ont été ensuite laissé au repos à la température ambiante pendant 30 min.
- Leur absorbance a été mesurée à 517 nm en utilisant un spectrophotomètre (Shimadzu, UV 1800, Japan).
- La solution de DPPH qui ne contient pas un échantillon d'ail a été utilisé comme témoin (**Bae et al., 2014**).
- Le Trolox a été utilisé pour établir la courbe d'étalonnage et les résultats ont été exprimés en mg de Trolox par g d'échantillon séché.

### 2.9. Analyses statistiques

L'analyse de la variance (ANOVA) a été effectuée en utilisant la procédure des modèles linéaires généraux (GLM) fournie dans la version logicielle 11.0 (2008) de SigmaPlot\SPW11. Les expériences ont été effectuées en triple et les moyennes des trois ensembles de données sont indiquées. Les moyennes étaient séparées par les différences les moins importantes selon les multiples plages de Duncan.

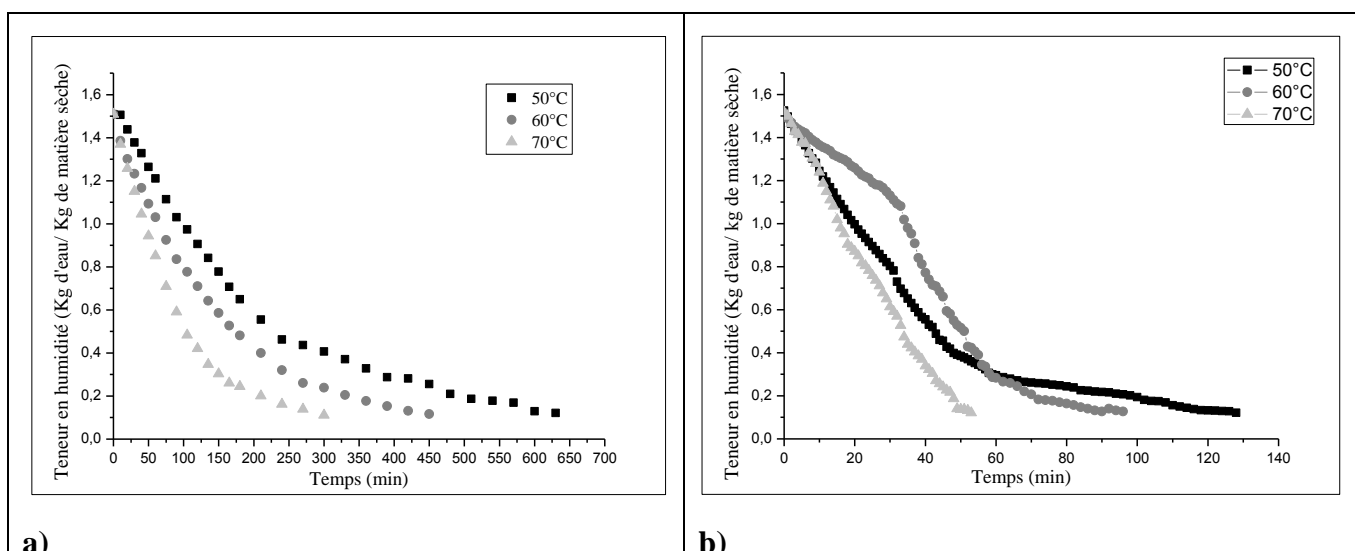
## 3. Résultats et discussion

### 3.1. Cinétique de séchage

Pour les deux méthodes du séchage, le changement de la teneur en humidité des tranches de l'ail avec le temps a été présenté par une courbe de séchage typique (figure 20). La teneur en humidité des tranches de l'ail a diminué de façon exponentielle avec le temps de séchage pour les deux méthodes de séchage. Cette diminution était plus élevée pour le séchage par micro-ondes assisté à l'air chaud que pour le séchage conventionnel à air chaud pour toutes les températures. Cela peut être attribué à la génération de chaleur interne dans les échantillons lorsqu'ils sont exposés aux micro-ondes.

Pendant la phase initiale du séchage, la teneur en humidité des tranches de l'ail était relativement élevée, ce qui a entraîné une absorption plus élevée de la puissance des micro-ondes et a entraîné une augmentation de la température des échantillons et une diffusion rapide de l'humidité (**Sharma et Suresh, 2001; Taner et al., 2003; Tilahun et al., 2011; Dehghannya et al., 2017**).

Le chauffage interne par micro-ondes s'est révélé être une méthode efficace pour améliorer le séchage, ce qui est conforme au rapport précédent (**Itaya et al., 2002**). La chaleur est générée lorsque les micro-ondes interagissent avec les molécules d'eau polaires dans les fruits et les légumes et un taux de séchage significativement élevé par rapport au séchage à l'air (**Schiffmann, 1992**). Pendant le séchage conventionnel, l'humidité est initialement évaporée de la surface tandis que l'eau liée en tranches de l'ail diffuse lentement à la surface (**Tilahun et al., 2011**). Contrairement à la méthode SMAC, la chaleur circule de l'intérieur vers l'extérieur et dépend des propriétés diélectriques des aliments. Cela permet d'atteindre une température cible plus rapidement (**İlter et al., 2018; Condurso et al., 2019**).



**Figure 20:** Teneur en humidité des tranches de l'ail aux différentes températures:  
a) SC, b) SMAC.

Cependant; le temps de séchage est de 630 min pour les tranches d'ail séchées sous SC et de 53 min ceux séchées sous SMAC. Il est clairement évident que l'implication de l'énergie des microondes pendant le processus de séchage a augmenté l'évaporation de l'humidité. Les résultats ont indiqué que le transfert de masse et le transfert thermique à l'intérieur de l'échantillon étaient accélérés par le séchage par microondes. la diffusion de l'humidité à partir du cœur et de la surface est accéléré en même temps le processus de séchage (Tilahun *et al.*, 2011).

Ce comportement était en accord avec İlter *et al.*, (2018) et Condurso *et al.*, (2019); qui ont étudié l'effet du séchage à l'air chaud et celui de la microonde sur la cinétique de séchage de la purée d'ail et des tranches de l'ail respectivement. Ils ont également découvert que le temps de séchage des tranches d'ail était de 6h 30min dans un séchoir à l'air chaud et 5.5min dans un séchoir à microondes. Par contre le séchage de la purée, le temps de séchage est de 8h pour séchage à l'air chaud et de 5 min pour le séchage à microonde.

Ainsi, Plusieurs auteurs ont signalé des observations similaires de réduction de temps de séchage des produits végétaux tel que les tranches de citrouille (Zielinska *et al.*, 2016), myrtille (Aral et Beşe, 2016) et chrysanthème (Wang *et al.*, 2018).

Pour les deux méthodes, la température joue un rôle déterminant dans le temps du séchage des tranches de l'ail. Le taux de perte d'humidité était plus élevé à des températures plus élevées et le temps de séchage total a été considérablement réduit avec l'augmentation de la température de l'air. Ces résultats sont conformes aux résultats d'études antérieures sur la carotte (Zielinska et Markowski, 2010), le champignon (Tulek, 2011), les bleuets (Lopez *et al.*, 2010) et le brocolis (MD Salim *et al.*, 2016).

Sous SC, le temps de séchage requis pour abaisser le taux d'humidité de 63% à 12% à 50°C était le double de celui requis à une température de séchage de 70°C. La même tendance dans la relation entre la température et le temps de séchage a été observée sous SMAC dont il était de 128 min à 50°C et de 53 min à 70°C.

Des résultats similaires ont été signalés pour la paille de lin (Nair et al., 2012), Moringa oleifera (Dev et al., 2011); les tranches de citrouille (Alibas, 2007); tranches de brocoli (MD Salim et al., 2016); purée de l'ail (İlter et al., 2018) et les tranche de l'ail (Demiray et Tulek, 2014).

Cependant, le séchage à haute température n'est pas suggéré en raison d'effets nocifs sur les composants alimentaires comme les protéines, les vitamines, la couleur, etc. Plusieurs rapports de recherche ont également montré une détérioration de la qualité à mesure que la température de l'air de séchage augmente. À mesure que la température de séchage augmente, la qualité attribuée aux produits séchés se détériore (Tilahun et al., 2011).

### 3.2. Modélisation des données de séchage

Les méthodes de description du processus de séchage avec des modèles de séchage en couche mince sont largement rapportées dans la littérature.

Le choix des modèles de séchage ont été utilisés pour décrire le processus de séchage des tranches d'ail (tableau 11). Une analyse de régression non linéaire a été effectuée pour déterminer les valeurs  $R^2$ , RMSE et  $X^2$ . Ces derniers ont été utilisés pour évaluer la qualité de l'ajustement des modèles et les résultats ont été donnés dans le tableau 12 pour différentes températures de séchage SC et SMAC respectivement.

Comme le montre les tableaux, les sept modèles de séchage ont tous donné un coefficient de corrélation ( $R^2$ ) supérieur à la valeur acceptable de ( $R^2$ ) de 0,93 à toutes les températures de l'air de séchage, ce qui indique un bon ajustement.

Parmi les sept modèles de séchage, les modèles Henderson and Pabis, Two-term et Midilli et al. (2002) ont donné les valeurs les plus élevées de ( $R^2$ ) et les valeurs les plus faibles de RMSE et de  $X^2$  pour les deux méthodes de séchage. Ces modèles représentaient les valeurs expérimentales de MR de manière satisfaisante. Fante et Noreña (2013); ont observé que le modèle Henderson and Pabis donnait le meilleur ajustement aux données de séchage à l'air chaud des tranches d'ail.

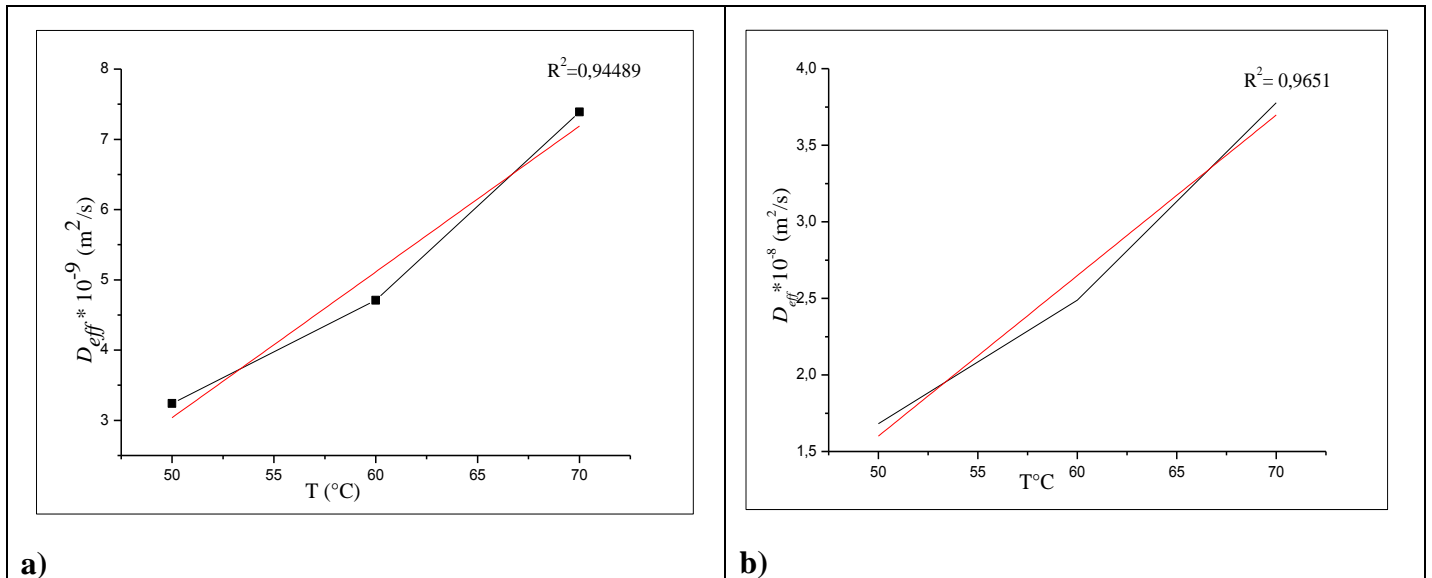
Comme on peut constater, un bon accord entre les variables et les résultats précédents de Madamba et al., (1996); pour le séchage des tranches d'ail, de Doymaz et Pala (2002); pour le séchage du raisin et de Doymaz (2004) pour le séchage des carottes.

**Tableau 12:** Qualité d'adaptation des différents modèles par séchage SMAC et séchage au SC aux différentes températures.

Modèle de SMAC	Coefficients	50°C	60°C	70°C
1	R <sup>2</sup>	0,9931	0,937	0,9755
	$\chi^2$	0,0010	0,0124	0,0039
	RMSE	0,0033	0,0125	0,0085
2	R <sub>2</sub>	0,994	0,9556	0,9848
	$\chi^2$	0,0009	0,0089	0,0025
	RMSE	0,0031	0,0106	0,0068
3	R <sup>2</sup>	0,9951	0,9769	0,9987
	$\chi^2$	0,0007	0,0047	0,0002
	RMSE	0,0028	0,0077	0,0020
4	R <sup>2</sup>	0,9951	0,9556	0,9848
	$\chi^2$	0,0007	0,0091	0,0026
	RMSE	0,0028	0,0107	0,0070
5	R <sup>2</sup>	0,9951	0,9769	0,9987
	$\chi^2$	0,0007	0,0048	0,0002
	RMSE	0,0028	0,0078	0,0021
6	R <sup>2</sup>	0,9951	0,9556	0,9848
	$\chi^2$	0,0007	0,0094	0,0027
	RMSE	0,0028	0,0109	0,0071
7	R <sup>2</sup>	0,9929	0,9783	0,9993
	$\chi^2$	0,0011	0,0044	0,0025
	RMSE	0,0034	0,0075	0,0069
Modèle de SC	Coefficients	50°C	60°C	70°C
1	R <sup>2</sup>	0,9971	0,9993	0,998
	$\chi^2$	0,0001	3,49964E-05	0,0001
	RMSE	0,00135	0,0006	0,0014
2	R <sub>2</sub>	0,9978	0,9996	1
	$\chi^2$	0,0001	2,2443E-05	0,00012
	RMSE	0,0012	0,0005	0,0015
3	R <sup>2</sup>	0,9987	1	1
	$\chi^2$	7,80728E-05	3,59173E-05	0,0001
	RMSE	0,0009	0,0006	0,0015
4	R <sup>2</sup>	0,9987	0,9998	1
	$\chi^2$	7,89308E-05	1,31985E-05	0,0001
	RMSE	0,0009	0,0004	0,0015
5	R <sup>2</sup>	0,9987	1	1
	$\chi^2$	7,97905E-05	3,68881E-05	0,0001
	RMSE	0,0009	0,0006	0,0015
6	R <sup>2</sup>	0,9987	1	1
	$\chi^2$	8,07045E-05	3,73934E-05	0,0001
	RMSE	0,0009	0,0006	0,0015
7	R <sup>2</sup>	0,9941	0,997	0,9962
	$\chi^2$	0,0003	0,0001	0,0003
	RMSE	0,0020	0,0015	0,0026

### 3.3. Diffusivité effective

La diffusivité effective de l'humidité ( $D_{eff}$ ), pour les tranches d'ail dans diverses conditions de séchage a été estimée à partir de l'équation (7). Les ( $D_{eff}$ ) des tranches d'ail séchées aux différentes températures ont été obtenues à partir du gradient du graphique, comme indiqué sur la figure 21. Il est généralement déterminé en traçant les données expérimentales du séchage en termes de  $\ln(MR)$  en fonction du temps.



**Figure 21:** Coefficient de diffusivité efficace ( $D_{eff}$ ) aux différentes températures  
a) SC et b) SMAC.

Les valeurs de diffusivité effective pour le séchage à l'air chaud et le séchage aux micro-ondes assisté à l'air chaud ont été trouvées dans une plage de  $3.24 \times 10^{-9}$  à  $7.39 \times 10^{-9} m^2/s$  et de  $1.68 \times 10^{-8}$  à  $3.77 \times 10^{-8} m^2/s$ , respectivement. Ces résultats sont de l'ordre de grandeur général de  $10^{-8} \cdot 10^{-12} m^2/s$  pour le séchage des matières biologiques (Md Salim et al., 2017).

Pendant ce temps, les valeurs de ( $D_{eff}$ ) des tranches de l'ail obtenues sous SMAC sont plus élevées que SC. Cela indique l'effet de l'énergie de micro-ondes sur l'élimination plus rapide de l'humidité (Dehghannya et al., 2017).

Les valeurs ( $D_{eff}$ ) des tranches de l'ail ont augmenté avec l'augmentation de la température du séchage pour les deux méthodes. 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).

La méthode et la température du séchage ont eu un effet significatif sur la valeur de ( $D_{eff}$ ). Au séchage SMAC, lorsque la température augmente, l'énergie fournie par microonde est transmise aux molécules d'eau, augmentant la température interne de l'échantillon et augmentant la pression de vapeur et, par conséquent, augmentant la diffusion de l'humidité vers la surface de l'échantillon (Castro, 2018; Chen et al., 2017).

Les résultats obtenus dans la présente étude corroborent ceux rapportés précédemment pour le séchage des tranches d'oignon, les gousses d'ail, la purée de l'ail, d'olive, des bleuets et des graines de grenade (Sharma *et al.*, 2005; Sharma et Prasad, 2006; Meziane, 2011; Doymaz, 2012; Sadin *et al.*, 2014; Zielinska, 2016).

### 3.4. Energie d'activation

Les valeurs de ( $E_a$ ) sont calculées à partir des équations (7). L'énergie d'activation obtenue par le séchage convectif à l'air chaud et le séchage SMAC des tranches de l'ail sont respectivement de 40,56 kJ/mol et de 33,63 kJ/mol. Des valeurs d'énergie d'activation similaires ont été trouvées pour le séchage de l'ail dont; la plage est de de 40,10 à 20,50 kJ/mol pour le séchage des gousses d'ail dans un séchoir à convection au microondes (Sharma et Prasad, 2005), 43,48 kJ/mol pour le séchage des tranches d'ail en séchoir barquette (Demiray et Tulek, 2014). Zogzas *et al.*, (1996); ont également souligné que les énergies d'activation de la plupart des produits agricoles se situent dans la plage de 12,7 à 110 kJ/mol.

L'énergie d'activation a considérablement diminué au cours du processus de micro-ondes assisté à l'air chaud par rapport au processus de séchage à l'air chaud. Cette réduction d'énergie d'activation est due à l'effet de chauffage volumétrique des micro-ondes, qui réduit considérablement le temps de séchage. Une réduction similaire d'énergie a également été observée dans d'autres études de séchage par convection aux micro-ondes, par rapport au séchage par convection (Sharma et Prasad, 2006).

### 3.5. Couleur

Parmi plusieurs attributs de qualité subjective des tranches de l'ail séchées, la couleur est importante. Elle indique le niveau des effets des différentes méthodes ou conditions de séchage. Elle joue un rôle crucial, surtout en ce qui concerne les préférences des consommateurs.

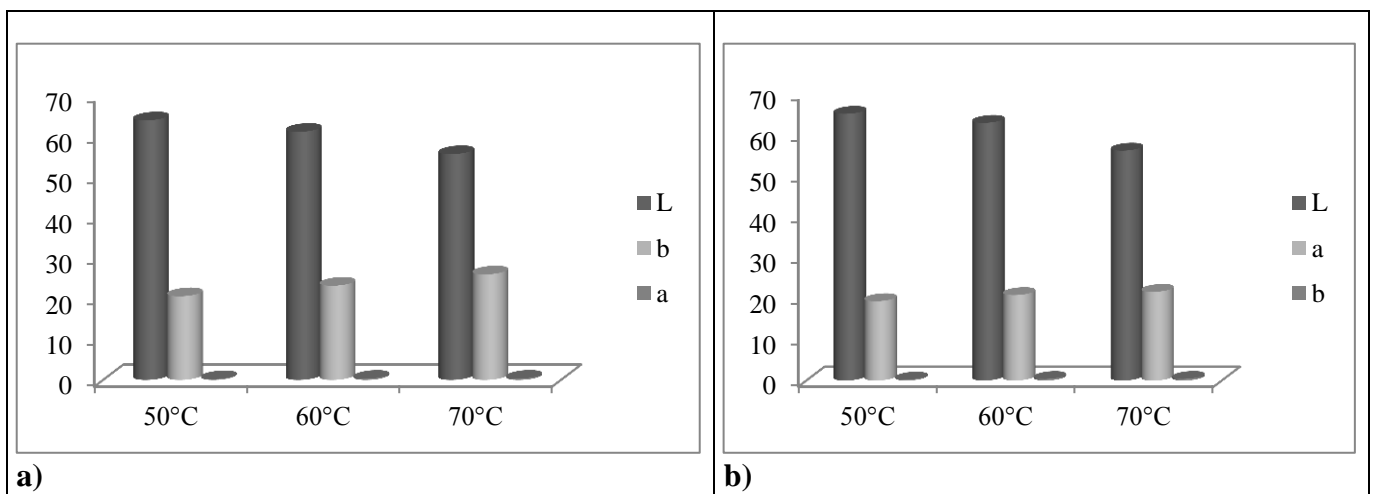
Les valeurs moyennes de  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  pour les tranches de l'ail fraîche ainsi que pour les tranches séchées sont données dans la figure 22. Selon les résultats obtenus, la couleur de l'ail frais, séché à l'air chaud et séché au microondes assisté à l'air chaud était en jaune. Le principal changement dans les valeurs de couleur des tranches d'ail séchée a été observé dans les valeurs  $L^*$  et  $b^*$ .

Les données ont clairement montré que les tranches d'ail séchées se sont révélées plus foncées que les tranches fraîches, car la valeur  $L^*$  a diminué pour tous les tranches séchés par rapport aux valeurs  $L^*$  des tranches d'ail fraîches. Cette changement couleur des tranches est due à la chaleur et à l'oxydation pendant le séchage et à l'activité résiduelle de l'enzyme polyphénoloxydase, qui provoque un brunissement pendant le processus de séchage (Omolola *et al.*, 2019). Les conditions de séchage ont eu des effets sur les changements de couleur des aliments (Tilahun *et al.*, 2011).



Ainsi, Il ressort clairement que les tranches d'ail séchées au SMAC étaient de couleur claire par rapport aux tranches d'ail séchées par séchage à l'air chaud. Ceci s'explique par les valeurs élevées de  $L^*$  (de 65.15 à 56.15) de l'ail séché par microonde assisté à l'air chaud par rapport aux valeurs de  $L^*$  (de 61.04 à 55.55) de l'ail déshydratés par l'air chaud. Dans des études antérieures, il a été signalé que le séchage par microondes préservait la couleur de l'ail brillante (Figiel, 2009; Calín-Sánchez et al., 2014; Bozkir et al., 2019). Les processus d'oxydation catalysés par les (PPO) sont favorisés par le temps d'exposition plus long à l'air chaud (Reinkensmeier et al., 2016).

Cependant, Il a été constaté qu'avec une augmentation de la température de l'air, la couleur devenait plus foncée, ce qui impliquait un plus grand brunissement des tranches de l'ail. Il est bien connu qu'une température élevée et un temps de séchage long provoquent une diminution significative de la qualité des matériaux séchés en termes de propriété de couleur (Sharma et Prasad, 2005; Cui et al., 2003). Sharma et Prasad (2005); ont également observé que la couleur des gousses d'ail séchées devenait brune à une température de séchage élevée. Ainsi, la perte de compartimentation sous-cellulaire due à des températures plus élevées provoque un contact entre la polyphénol oxydase (PPO) et les substrats phénoliques vacuolaires (Gennaro et al., 2019).



**Figure 22:** Variation des paramètres de la couleur des tranches de l'ail séchés par: a) SC, b) SMAC.

D'un autre côté, la valeur  $b^*$  a montré une augmentation de jaunissement après les processus de séchage. Cette augmentation est également liée à la réaction de Maillard qui se produit en présence d'oxygène et d'humidité lors du séchage à l'air chaud (İlter et al., 2018).

Dans une autre étude, Cui et al., (2003); et Bozkir et al., (2019); ont trouvé la valeur de  $b^*$  des tranches de l'ail beaucoup plus faible dans les échantillons du séchage au microonde que dans les échantillons de séchage à l'air.

Les variations globales de couleur ( $\Delta E$ ) étaient mineures dans les échantillons séchés avec SMAC. Ces résultats ont indiqué l'efficacité du SMAC par rapport au séchage convectif pour préserver les

caractéristiques chromatiques des tranches de l'ail, principalement en raison du temps de traitement thermique plus court.

### 3.6. Texture

Les valeurs de dureté des tranches de l'ail séché dans diverses conditions variaient entre 16.02 et 50.08 N (tableau 13). Les échantillons frais avaient une dureté de 11.35 N. Le processus de séchage a augmenté le niveau de rigidité de près de cinq fois en raison de la perte d'adhérence cellulaire et de la turgescence des cellules parenchymateuses, due à la déshydratation (Süfer et Palazoğlu, 2019).

Les valeurs de la dureté sont élevées lors du séchage à l'air chaud par rapport au séchage à micro-onde assisté à l'air chaud en raison du problème de durcissement rapide.

La dureté des tranches de l'ail séché augmente avec l'augmentation de la température de l'air pour les deux méthodes de séchage. Il a été signalé que le durcissement était un problème majeur pendant le processus de séchage des produits agricoles à forte humidité (İlter et al., 2018).

Zhang et al., (2011); ont indiqué que le mécanisme de transfert d'humidité dans le séchage aux micro-ondes et le séchage à l'air chaud était différent, ce qui à son tour conduisait à des aspects et des caractéristiques de texture différents. Une explication possible des mauvaises caractéristiques de texture des tranches de l'ail séchés à l'air chaud était que le liquide diffusait de l'intérieur vers la surface pendant le processus de séchage à l'air chaud et transportait des solutés avec le liquide. Au fur et à mesure que l'humidité de surface s'évaporait, le soluté se concentrait et précipitait, laissant une peau dure et sèche (Yangyang et al., 2019).

**Tableau 13:** Effets de la température sur la dureté des tranches d'ail séchées au SC et au SMAC.

Température	Echantillon	Dureté
50°C	Contrôle	11.35±2.15
	CD	49.12± 2.09
	MWCD	16.02± 2.09
60°C	CD	49.71± 3.13
	MWCD	20.15± 3.13
70°C	CD	50.08± 3.15
	MWCD	27.66± 3.15

### 3.7. Teneur en polyphénols totaux

La teneur en composés phénoliques totaux des tranches de l'ail séchées a été déterminée par une courbe standard d'acide gallique, les résultats sont présentés sur la figure 23.

La teneur en polyphénols totaux a significativement diminué après le processus de séchage. Les valeurs variaient entre de 134.46 à 301.62 mg d'acide gallique/100g MS pour SC, de 236.14 à 335.75

mg d'acide gallique/100g MS pour SMAC. Tant que, la teneur des tranche frais est de 975.02 mg d'acide gallique/100g MS.

Pour les deux méthodes du séchage, une température de l'air élevée et un temps de séchage plus courts ont entraîné un TPC élevé. Ceci est dû au temps de séchage plus court (Calín-Sánchez et al., 2014).

La valeur la plus élevée des composés phénoliques totaux a été trouvé dans les tranches séchées au microonde assistée à l'air chaud à 70°C, tandis que la teneur la plus faible a été trouvée dans les tranches de l'ail séchées à l'air chaud à 50°C.

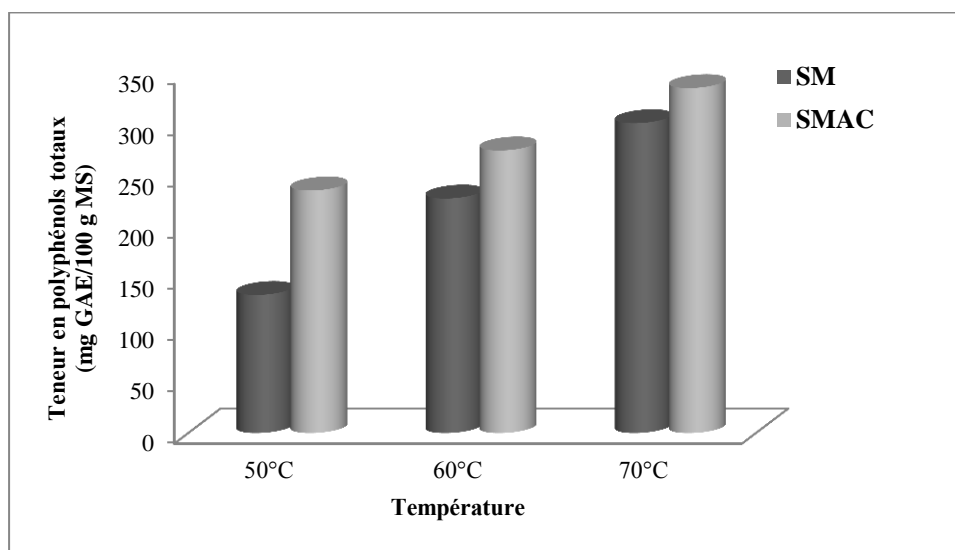


Figure 23: Teneur en polyphénols totaux de l'ail séché au SC et au SMAC.

Les propriétés physicochimiques et la structure chimique des composés phénoliques peuvent être affectées par la méthode de séchage, la température et le temps de traitement (Galaz et al., 2017).

Des résultats similaires ont indiqué que le séchage diminué la teneur en polyphénols dans les fraises (Wojdyło et al., 2009) et la grenade (Calín-Sánchez et al., 2013) et des tranches de l'ail (Calín-Sánchez et al., 2014).

### 3.8. Activité antioxydante

Le test radical DPPH; est une méthode largement utilisée pour évaluer la capacité antioxydant des extraits de différents matériaux végétaux.

Les valeurs de DPPH des tranches de l'ail séché ont été obtenues dans la plage de 0.57 à 0.68 mg de Tolorex/g MS pour le séchage par SMAC et dans la plage de 0.51 à 0.62 mg de Tolorex/g MS pour le séchage SC. Les tranches de l'ail séchés au microonde présente une activité antioxydante élevée que celle séché à l'air chaud.

La capacité antioxydante des tranches de l'ail a augmenté avec l'augmentation de la température.

La température et la méthode de séchage ont montré une variabilité de l'activité antioxydante des tranches de l'ail (figure 24). Différents processus de séchage ont provoqué une diversité significative

de la capacité antioxydant des tranches de l'ail, mais tous ont montré d'excellents effets de piégeage sur les radicaux DPPH. Des résultats similaires ont été observés par (Süfer et Palazoğlu, 2019), qui ont rapporté que l'activité antioxydant totale des arilles de grenade séchées aux différentes températures (55, 65, 75°C); avait considérablement augmenté avec l'augmentation de la température.

Ce comportement pourrait être due que le traitement thermique peut induire la formation de nouveaux composés à haute capacité antioxydant; ces composés pourraient être ceux formés par la réaction de Maillard (Calín-Sánchez et al., 2014).

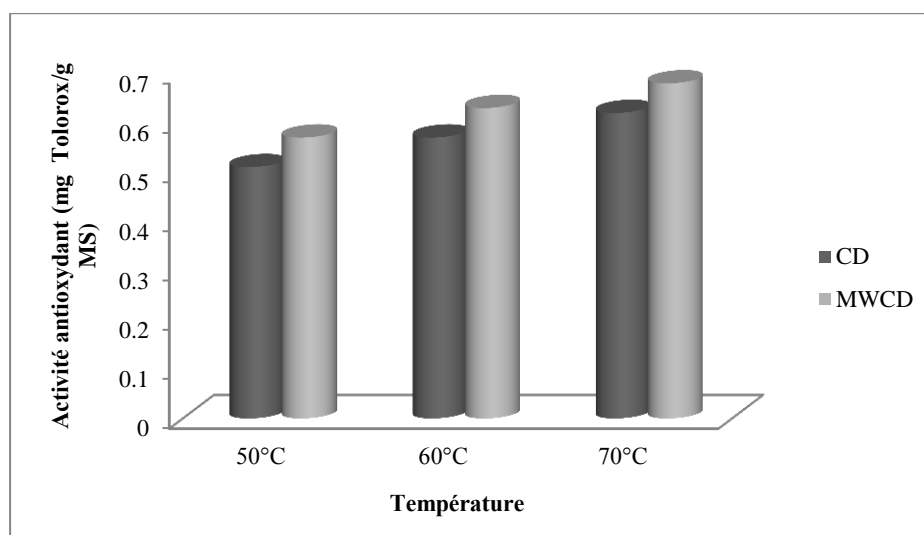


Figure 24: Activité antioxydante de l'ail séché au SC et au SMAC.

De plus, la capacité antioxydant pourrait être attribuée non seulement aux composés phénoliques qui sont responsables de la capacité antioxydant de l'ail séché. Par exemple, Li et al., (2007); ont signalé une augmentation de l'allicine lors du traitement thermique de la poudre d'ail. L'allicine et ses produits dérivés ont été décrits comme de puissants antioxydants naturels (Yong, 2006; Youji et al., 2006). La présence d'allicine et de ses produits dérivés pourrait être responsable, au moins en partie, de la capacité antioxydant élevée des tranches d'ail séchées (Calín-Sánchez et al., 2014).

### Conclusion

Dans cette étude, le comportement du séchage des tranches de l'ail a été étudié sous deux méthodes SC et SMAC. Les résultats ont montré que le temps de séchage diminuait considérablement avec l'augmentation de la température pour les deux systèmes de séchage. Tant que, le séchage aux micro-ondes assisté à l'air chaud peut réduire le temps de séchage jusqu'à 55% par rapport à SC seul.

Les modèles Two-term, Midilli et al., (2002); et Henderson and Pabis and ont donné un excellent ajustement des données expérimentales pour toutes les conditions de séchage. La diffusivité efficace de l'humidité, ( $D_{eff}$ ) a augmenté avec l'augmentation de la température. Les valeurs de  $D_{eff}$  des tranches de l'ail séchées sous SMAC sont plus élevées que celles séchées sous SC seule. De plus, les changements de couleur étaient moins observés à basse température sous SMAC.

Il a été constaté que la combinaison de l'utilisation des micro-ondes et du séchage à l'air chaud pouvait produire des tranches de l'ail avec une bonne couleur et des propriétés texturales excellentes.

De plus, il a eu un effet positif sur la conservation de la teneur en composés phénoliques totaux et l'activité antioxydant.

Nos données suggèrent que le séchage micro-ondes combiné à air chaud peut être utilisé pour le traitement et la conservation de produits de haute qualité avec des économies d'énergie et de temps.

Néanmoins, des études supplémentaires sont nécessaires pour optimiser les meilleures conditions de conservation des tranches de l'ail, tels que le matériau d'emballage et l'environnement de stockage.

# **Partie Expérimentale**

## **Chapitre 3**

## Déshydratation osmotique

### Résumé

Le but de cette étude était de déterminer les conditions optimales de déshydratation osmotique utilisée comme un prétraitement pour faciliter le séchage convectif des tranches de l'ail. Le prétraitement par déshydratation a été effectué aux différentes concentrations de chlorure de sodium de 10, 15 ou 20% aux différentes températures de 25, 35 et 45°C et suivie d'un séchage convectif à 50 ou 60°C. Le rapport ail/solution était de 1:4 (w/w). La durée de prétraitement est 180 min. Les conditions optimales de prétraitement étaient de 15% de sel à 35°C, ce qui a conduit à une perte d'eau de 41,57% et un gain de solides de 9,52%.

Les résultats ont montré que l'augmentation de la température du séchage diminue le temps de séchage des tranches d'ail non prétraitées et prétraitées. Le temps du séchage a été réduit de 2,25 et 1,31 à 50°C et 60°C respectivement par rapport aux tranches d'ail non traitées.  $D_{eff}$  augmentait avec la température du séchage pour les tranches d'ail prétraitées et non prétraitées. Les valeurs de  $D_{eff}$  des tranches d'ail non prétraitées et prétraitées variaient respectivement de  $1,34 \cdot 10^{-10}$  à  $2,34 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s et  $2,72 \times 10^{-10}$  à  $4,29 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s. L'énergie d'activation ( $E_a$ ) des tranches d'ail non prétraitées et prétraitées a été obtenue respectivement de 39,92 kJ/mol et de 27,63 kJ/mol.

La déshydratation osmotique apparaît ainsi comme un prétraitement pour les industries agro-alimentaires à la recherche d'un moyen de réduire les temps de séchage des produits.

### 1. Introduction

L'ail (*Allium sativum* L.) est l'un des légumes les plus couramment utilisés dans monde entier. Parmi les espèces d'*Allium sativum* est actuellement deuxième après l'oignon dans la production des cultures. De plus, l'ail est une plante nutraceutique riche en phytonutriments, censée aider à prévenir un grand nombre de maladies, dont le cancer (Vemuri et al., 2017), les maladies cardiovasculaires (Siddiqui et al., 2017), l'obésité (Chen et al., 2014), hypercholestérolémie (Cheng et al., 2013), diabète de type 2 (Naidu et al., 2016), hypertension (Xiong et al., 2015) et troubles gastro-intestinal (El-Ashmawy et al., 2016).

La production mondiale d'ail est supérieure à 20 millions de tonnes, les plus grandes quantités étant produites en Chine, suivies de l'Inde, de la Corée et des États-Unis (Abano et al., 2011).

Cependant, en raison de sa teneur en humidité relativement élevée (base humide à 70%), l'ail frais ne peut pas être stocké à long terme. Au moins 30% de la récolte fraîche est perdue à cause de la détérioration par des micro-organismes (Pedraza Chaverri et al., 2007). Pour cette raison, l'ail et ses dérivés sont vendus principalement sous forme séchée. L'un des plus courants est la poudre d'ail, qui est produite à partir de gousses ou de tranches séchées. Depuis environ 2010, l'ail en tranches conservé par séchage conventionnel est devenu populaire. Cependant, la qualité de ce produit est fortement influencée par la méthode et les conditions de séchage (Fante et al., 2013).

Le séchage conventionnel à l'air chaud est un processus de transfert simultané de chaleur et de masse. Les inconvénients du séchage convectif des produits alimentaires sont les longs temps de

traitement, les pertes de propriétés fonctionnelles et nutritionnelles (Thuwapanichayanan *et al.*, 2014).

Pour certains aliments, un prétraitement par déshydratation osmotique a été utilisé avec succès pour réduire la teneur en eau initiale (N'Goran *et al.*, 2012), pour préserver la texture et la couleur naturelle des légumes (Chaguri *et al.*, 2016), pour inhiber l'enzyme (Moreno *et al.*, 2013), pour améliorer la rétention des arômes volatils pendant le séchage (Heredia *et al.*, 2012) et pour réduire le temps du séchage (Costa Ribeiro *et al.*, 2016). Cette technique est basée sur la mise en contact du produit frais avec des solutions concentrées de sel ou de sucre, entraînant ainsi simultanément deux transferts de matériaux à contre-courant: un grand transfert d'eau du produit vers la solution et un plus faible transfert de la solution vers le produit (Junqueira *et al.*, 2017).

Cependant, à mesure que le temps d'immersion augmente, la perte de molécules bioactives, de nutriments et de vitamines hydrosolubles de l'aliment augmente (Abraão *et al.*, 2013, Araya-Fariasetal, 2014). De nombreux facteurs tels que la température de la solution, la pression osmotique, le rapport de masse et les traitements antérieurs (blanchiment, ultrasons, champ électrique pulsé, etc.) sont influencés le taux de diffusion pendant la déshydratation osmotique des structures cellulaires semi-perméables (N'Goran *et al.*, 2012).

Parmi les fruits et légumes qui semblent bien réagir à la déshydratation osmotique, on trouve les pommes de terre (Goula *et al.*, 2017), les baies bleues (Yu *et al.*, 2018), les aubergines (Junqueira *et al.*, 2017), le yacon (de Oliveira *et al.*, 2016), mangue (Jimenez-Hernandez *et al.*, 2017), olives (Bonatsou *et al.*, 2016), kiwi (Traffano-Schiffo *et al.*, 2017), ananas (Silva *et al.*, 2014), les carottes (Singh *et al.*, 2007) et les oignons (Sutarand et Gupta, 2007).

La déshydratation osmotique combinée au séchage a été modélisée et optimisée pour des conditions de fonctionnement qui minimisent le temps de traitement total tout en préservant la qualité du produit. Les fruits et légumes qui ont été testés à l'aide de cette approche comprennent le coing (Dehghannya *et al.*, 2017), les arilles de grenade (Cano-Lamadrid *et al.*, 2017), les fraises (Prosapio et Norton, 2017; Amami *et al.*, 2017), poires (Costa Ribeiro *et al.*, 2016), pommes (Sabetghadam et Tavakolipour, 2015), champignons (Darvishi *et al.*, 2018) et tomates (Souza *et al.*, 2007). Le séchage des tranches de l'ail prétraité par la déshydratation osmotique n'a pas été bien étudié.

L'objectif principal de cette étude était donc d'optimiser un processus de séchage de l'ail prétraité par déshydratation osmotique.



## 2. Matériels et méthodes

### 2.1. Matériel végétal

L'ail (*Allium sativum* L., El-Hamra) a été récolté à Harrouche, un village de Skikda, province, à l'est de l'Algérie. Les bulbes d'ail ont été stockés dans un endroit sec à température ambiante (20°C) jusqu'à l'utilisation. Les bulbes ont été séparés en gousses, pelés puis tranchés en morceaux uniformes de 2 mm d'épaisseur. La teneur en humidité des échantillons a été déterminée par séchage dans une étuve à vide (Binder DV53, Francfort, Allemagne) à 70°C pendant 24h selon la méthode de l'Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 2010). La teneur en humidité initiale des échantillons d'ail était de  $63 \pm 0,5\%$  (w/b).

### 2.2 Traitement de la déshydratation osmotique

Les tranches de l'ail ont été blanchi dans de l'eau bouillante à 100°C pendant 30 secondes, puis plongé dans de l'eau glacée puis dans une solution de méta-bisulfate de sodium à 1% pendant une seconde et finalement rincé immédiatement avec de l'eau distillée.

Les échantillons ont ensuite été soumis à une déshydratation osmotique dans des solutions de chlorure de sodium (NaCl) à des concentrations de 10%, 15% et 20% aux différentes températures 25°C, 35°C et 45°C. Des flacons Erlenmeyer (100ml) recouverts avec Parafilm™ pour éviter l'évaporation, sont utilisés dans un incubateur (New Brunswick Innova™ 40, 230V, 50Hz). Pour les neuf combinaisons de conditions, le rapport solution / ail était de 1: 4 (p/p). Les tranches ont été retirées des flacons à 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 60, 90, 120, 150 et 180 min. Chaque tranche a été immédiatement rincée avec de l'eau distillée, mise en contact avec du papier absorbant et pesée. La perte d'eau (WL) et le gain de solides (GS) ont été exprimés en utilisant les équations (9) et (10).

$$WL = \frac{(M_0 - S_0) - (M_t - S_t)}{M_0} \times 100 \quad (9)$$

$$GS = \frac{S_t - S_0}{S_0} \times 100 \quad (10)$$

Où «  $M_0$  », «  $M_t$  », «  $S_0$  » et  $S_t$  sont la masse initiale, la masse finale, la masse sèche initiale et la masse sèche finale de l'échantillon, respectivement.

### 2.3. Séchage convectif

L'expérience de séchage par convection a été réalisée dans une étuve de séchage conventionnelle (modèle MEMMERT UF750, Allemagne). L'expérience a été effectuée aux différentes températures 50, 60 et 70°C et à un débit d'air de 2 m/s. La perte du poids de l'échantillon pendant le séchage a été mesuré à des intervalles de 10 minutes. Le processus de séchage a été arrêté lorsque la teneur en humidité était d'environ  $12 \pm 0,2\%$ . Les tranches d'ail séchées ont ensuite été transférées en sachets de polyéthylène sous vide après refroidissement.

Le taux d'humidité (MR) des tranches d'ail a été calculé en utilisant l'équation (1):

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_t} \quad (1)$$

Où «  $M_t$  » est la teneur en eau au moment (t), «  $M_0$  » est la teneur en humidité initiale et «  $M_e$  » est la teneur en humidité d'équilibre (le tout en kg d'eau par kg de matière sèche).

#### 2.4. Détermination de diffusivité effective

La deuxième loi de Fick a été utilisée pour déterminer le coefficient de diffusivité selon la méthode de **Sacilik (2007)**.

$$\frac{\delta M}{\delta t} = D_{eff} \nabla^2 M \quad (4)$$

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} t\right) \quad (5)$$

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} t \quad (6)$$

Où «  $D_{eff}$  » est la diffusivité effective en (m<sup>2</sup>/s), « MR » est le taux d'humidité (kg d'eau par kg de matière sèche) au temps t et « L » est la demi-épaisseur d'échantillon (m).

#### 2.5. Énergie d'activation

La dépendance de la diffusivité à la température d'humidité effective est décrite par l'équation d'Arrhenius (Equation 7):

$$D_{eff} = D_0 e^{\frac{E_a}{R(T+273.15)}} \quad (7)$$

Où «  $D_0$  » est le facteur pré-exponentiel d'Arrhenius (m<sup>2</sup>/s), «  $E_a$  » est l'énergie d'activation (kJ/mol), « R » est la constante de gaz universelle (kJ/mol·K) et « T » est la température du traitement (°C).

### 3. Résultats et discussion

#### 3.1. Déshydratation osmotique

Les pertes d'eau et les gains de solides mesurés pour les tranches de l'ail prétraité par déshydratation osmotique aux différentes températures et concentrations de sel sont illustrés à la figure 25.

Le plus grand gain de solide (Sel) était de 14,67%, qui a été obtenu après 120 minutes d'immersion dans 20% de NaCl, tandis que le plus petit gain était de 8,69%, qui a été obtenu après immersion pour la même durée dans 10% de NaCl. Ces deux traitements ont également produit les pertes d'eau les plus importantes et les plus faibles, respectivement 63,44% et 31,97%.

Ces expériences ont également montré que ces pertes et gains étaient plus rapides pendant la phase initiale de la déshydratation osmotique. Ceci corrobore les résultats rapportés par **Dermesonlouoglou et al., (2018)**; pour les baies, de **Goji Junqueira et al., (2017)**; ont également montré que la perte

d'eau et de gain de solides sont plus rapides. Cela n'est pas significatif car la différence de concentration et la force motrice de transfert de masse entre le fruit et la solution hypertonique sont les plus importantes à ce stade.

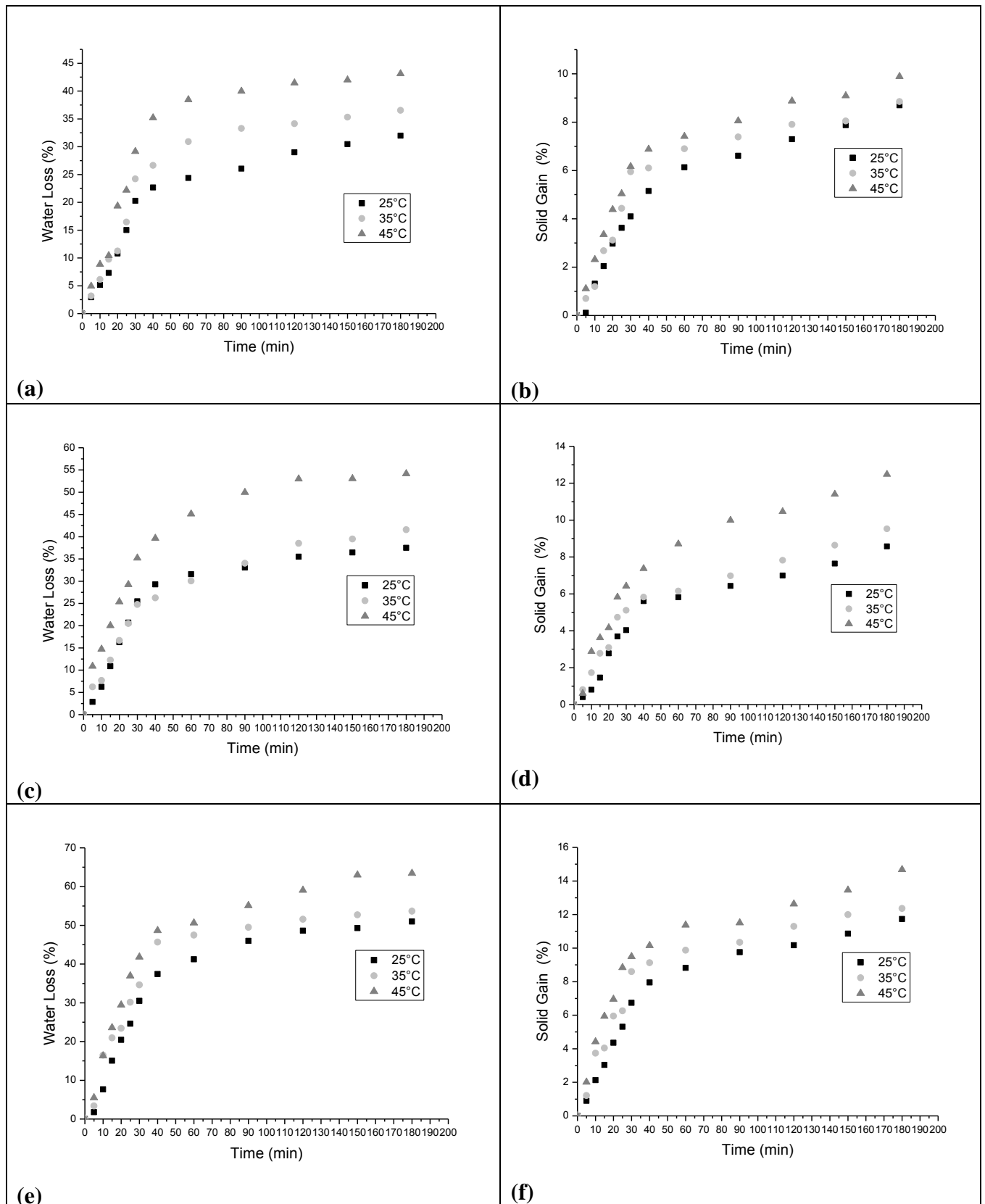
Le changement de transfert au cours des 2 heures de traitement est donc logarithmique, représentant une perte ou un gain maximal. La prolongation du temps d'immersion diminue néanmoins encore la fraction d'eau tout en augmentant la teneur en solides des tranches de l'ail (**Dermesonlouoglou et al., 2018**).

L'accumulation de sel ralentit considérablement la perte d'eau (**Souza et al., 2007, Junqueira et al., 2017**). Cela a également été signalé pour la déshydratation osmotique des tranches de banane (**Chaguri et al., 2016**) et de l'aubergine (**Junqueira et al., 2017**). Il apparaît également sur la figure 29 que la perte d'eau finale et le gain de solides sont les plus importants à la concentration et à la température de sel les plus élevées. En d'autres termes, la pression osmotique initiale et l'énergie thermique de la solution entraînent toutes deux le transfert d'eau de l'intérieur de l'ail vers le milieu extérieur (**Souza et al., 2016; Dehghannya et al., 2017**).

La concentration de sel affecte considérablement le gain de solides, ce qui suggère que le sel peut pénétrer dans les membranes cellulaires des tranches de l'ail (**Chaguri et al., 2016; de Oliveira et al., 2016; Amami et al., 2017; Prosapio et Norton, 2017; Prosapio et al., 2017**). Il est probable que les polymères entourant les parois cellulaires (et éventuellement les parois elles-mêmes) gonflent dans l'eau et que les membranes cellulaires sont perméables de l'eau ou le deviennent dans ces conditions (**Akbarian et al., 2014**).

L'augmentation de la perméabilité des parois et des membranes pourrait permettre la pénétration du sel et entraîner des changements structurels (**Junqueira et al., 2017**). Il est également possible qu'une pression osmotique accrue, la viscosité de la solution de sel soit plus faible et la résistance externe au transfert de masse à la surface du tissu de l'ail soit plus faible, facilitant ainsi le transfert d'eau (**Amami et al., 2017**).

Il a été prouvé que le trempage des tranches de l'ail dans une solution de NaCl augmente la mobilité de l'humidité dans le tissu, ce qui augmente le transfert de masse d'eau vers la solution de trempage (**Al-Harashseh et al., 2009**). Les ions sodium et chlorure imprègnent les tissus végétaux pendant le trempage et se réassocient lorsque le NaCl cristallise à l'intérieur des cellules, contrecarrant ainsi le rétrécissement des tissus et augmentant la mobilité de l'humidité dans l'échantillon et améliorant le transfert de masse (**Dehghannya et al., 2017**).



**Figure 25:** Cinétique de la perte d'eau et du gain de solides des tranches de l'ail pendant la déshydratation osmotique à 25°C, 35°C ou 45°C; **a, c, e)** perte d'eau dans 10%, 15% et 20% NaCl; **d, e, f)** gain de solides en NaCl à 10%, 15% et 20%.

L'effet de la température sur la perte d'eau (31,97%, 53,64% et 63,44% respectivement à 25°C, 35°C et 45°C) et sur le gain de solides pourrait être dû aux ions salins modifiant les caractéristiques diélectriques et donc l'uniformité des chauffage du produit (**Dehghannya et al., 2017**). Il est bien connu que des températures plus élevées augmentent la perméabilité de la membrane cellulaire (**Amami et al., 2017**) peut-être en gonflant seules, ce qui faciliterait le transfert de masse. D'autres chercheurs ont montré que des températures plus élevées favorisent l'écoulement de l'eau du fruit vers le milieu de osmotique (**Nono et al., 2001; Azoubel et Murr, 2004; Khoyi et Hesari, 2007**). À 45°C, les tranches de l'ail semblent subir des changements dans les propriétés physiques telles que la couleur.

Ceux-ci pourraient indiquer des changements dans la structure des parois cellulaires et des membranes conduisant à des pertes de sélectivité, à une perméabilité accrue et à l'absorption de solutés (**Amami et al., 2017**). Basée principalement sur la couleur, la déshydratation osmotique de les tranches de l'ail semblait optimale à 15% de NaCl et à 35°C. Dans ces conditions, la perte d'eau atteignait 41,57% et le gain de solides atteignait 9,52%, qui étaient les meilleurs résultats à reporter sur le processus du séchage.

### 3.2. Taux d'humidité et vitesse de séchage

La cinétique de séchage des tranches d'ail non traitées et prétraitées à 50°C et 60°C est illustrée dans figures 26 et 27. Le processus de séchage se caractérise par une diminution progressive de la teneur en eau au cours du temps aux deux températures. Lors de la phase initiale du séchage, l'eau libre à la surface de la tranche d'ail s'évapore rapidement (**Kaushal et Sharma, 2014**). Cela explique la forte pente de la première partie de la courbe. Cependant, à mesure que le séchage progresse, l'eau doit se déplacer de l'intérieur vers la surface, ce qui dépend de la diffusion du liquide, du mouvement capillaire et de la diffusion en surface et ralentit le taux d'évaporation de l'eau (**Kaushal et Sharma, 2014**).

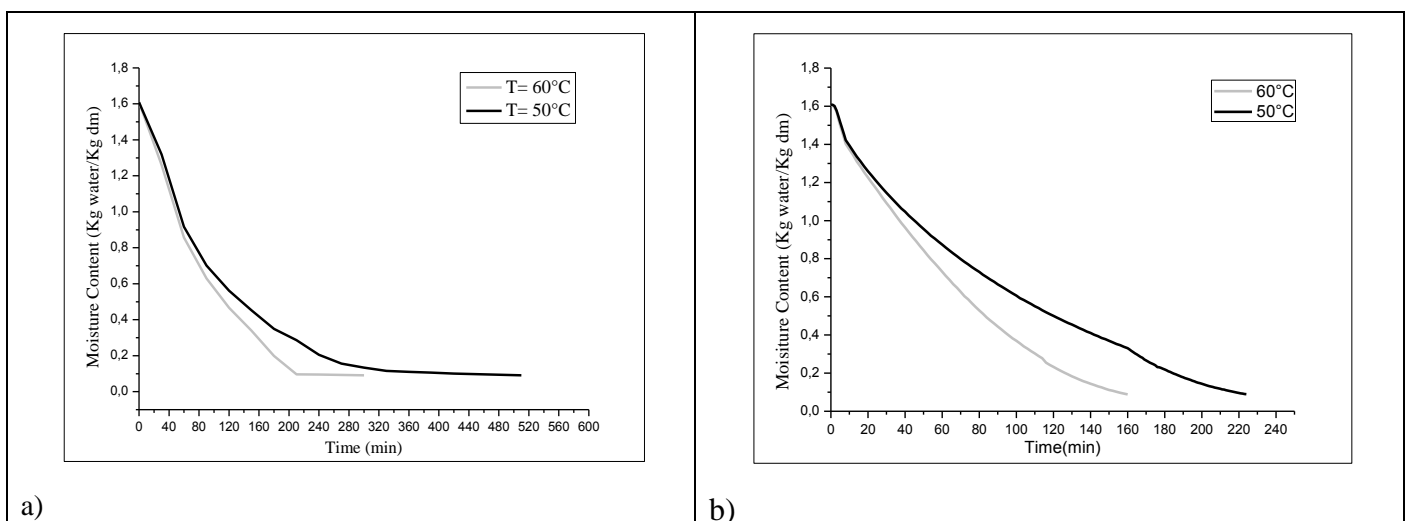
Les temps requis pour sécher les tranches d'ail fraîches de la teneur en humidité initiale ( $63 \pm 0,2\%$ ) à finale ( $9 \pm 1\%$ ) à 50°C et 60°C sont respectivement de 510 min et 210 min (figure 26). Pour les tranches d'ail déshydratées par osmose, ces durées sont réduit à 220 min et 160 min (figure 26b), car une partie considérable de l'eau a déjà été éliminée. Une fine couche de sel formée à la surface des tranches pré-déshydratées pourrait entraîner des changements dans la structure du tissu intracellulaire lorsque les effets de la pression osmotique et du séchage sont combinés (**Amami et al., 2017**). Cela pourrait avoir un effet sur la qualité du produit. Nos résultats corroborent ceux rapportés par **Amami et al., (2017)**; pour les fraises.

Sur la base de la mesure du taux d'humidité des tranches de l'ail pendant le processus de séchage, une déshydratation partielle par osmose a légèrement augmenté la perte d'eau.

La déshydratation induit la saturation des composants, entraînant une augmentation des forces de cohésion entre les molécules d'eau et les solutés et, par conséquent, une diminution de la mobilité moléculaire. Les interactions de l'eau avec d'autres composants sont des facteurs importants à prendre en compte non seulement dans le contrôle du processus, mais également en termes de stabilité et de qualité du produit final (Sette et al., 2016). Cela a été observé sur des figures sèches prétraitées par déshydratation osmotique (Şahin et Öztürk, 2016).

Les résultats actuels confirment la température élevée améliore considérablement la cinétique de séchage des tranches de l'ail, qu'il soit déshydraté ou non, car la pression de vapeur et la diffusion de l'eau doivent augmenter avec la température (Chen et al., 2017). Cela a été observé avec des pois (Şahin et Öztürk, 2016) et des légumes verts (Kek et al., 2013) soumis à une déshydratation osmotique suivie d'un séchage convectif. S'il n'en était pas ainsi, il faudrait examiner la possibilité que le processus de déshydratation forme en quelque sorte une barrière étanche à la surface du produit.

Les taux de séchage moyens à 60°C et 50°C sont respectivement de  $4,7 \cdot 10^{-3}$  et  $1,57 \cdot 10^{-3}$  pour les tranches de l'ail frais et  $5,79 \cdot 10^{-4}$  et  $1,93 \cdot 10^{-4}$  pour les tranches de l'ail pré-déshydraté. Les différences entre le frais et le pré-déshydraté peuvent refléter une résistance interne accrue au transfert de masse due à l'absorption de soluté (sel), comme cela a été observé pour le séchage de la papaye (El-Aouar et al., 2003). La pré-déshydratation peut également avoir augmenté la vitesse de séchage et donc la diffusivité de l'eau. Ces tendances peuvent s'expliquer par la chimie physique de la liaison à l'eau et les changements dans la structure des cellules de l'ail causés par le gain de solides (Cano-Lamadrid et al., 2017; Dermesonlouoglou et al., 2018).

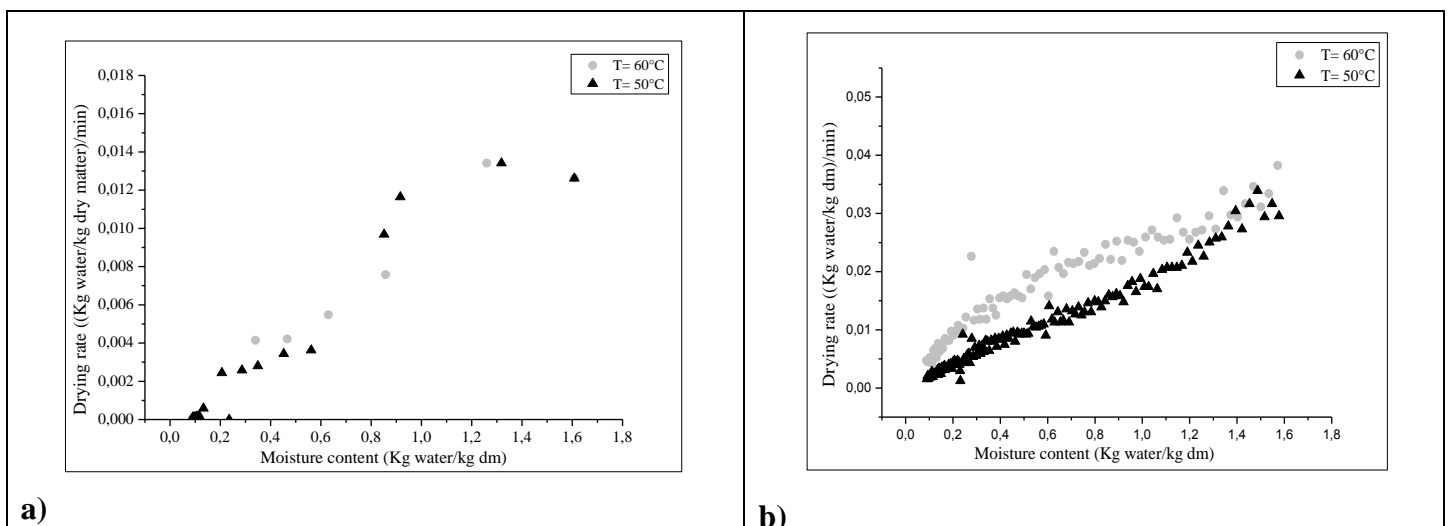


**Figure 26:** Teneur en humidité des tranches de l'ail en fonction du temps de Séchage; a) Tranches de l'ail Non prétraité, b) Tranches de l'ail prétraité.

Il est également noté que le taux de séchage a diminué au fur et à mesure que le processus de séchage progressait, et dans le cas des tranches de l'ail déshydraté séché à 50°C, il avait une relation presque linéaire avec la teneur en eau. À 60°C, la diminution semble s'accélérer à mesure que la teneur en humidité diminue, au moins dans le cas des tranches pré-déshydratées, pour lesquelles les données étaient plus abondantes.

Dans le cas des tranches d'ail fraîches, le taux de séchage a diminué à mesure que la teneur en humidité diminuait, bien que sur la base des données obtenues, il soit difficile de dire à quel moment cela s'est produit. En général, le taux de séchage semble être proportionnel à la teneur en humidité des aliments, c'est-à-dire la plus élevée au début du processus lorsque la teneur en humidité est élevée, et elle semble rester plus élevée plus longtemps à une température de séchage plus élevée.

Une température de séchage plus élevée diminue probablement le taux d'humidité plus rapidement en transférant plus de chaleur au légume et en accélérant ainsi la migration de l'humidité (Kaushal et Sharma, 2014). Des observations similaires ont été signalées pour le séchage des fraises (Amami et al., 2017).



**Figure 27:** Taux de séchage des tranches de l'ail en fonction de la teneur en humidité;

a) Tranches de l'ail non prétraités, b) Tranches de l'ail prétraités

### 3.3. Diffusivité efficace

Le  $D_{eff}$  est l'un des facteurs les plus importants de la cinétique de séchage et dépend des caractéristiques du produit. Ce paramètre englobe tous les mécanismes possibles du mouvement de l'humidité dans les aliments, y compris le liquide, la vapeur, la diffusion en surface, les écoulements capillaires et hydrostatiques (Dehghannya et al., 2017). La diffusivité effective de l'humidité a été calculée en utilisant la deuxième loi de Fick (équation 7). Les valeurs obtenues à 50°C et 60°C respectivement de  $1,34 \times 10^{-10}$  à  $2,34 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  pour les tranches non traités et  $2,72 \times 10^{-10}$  à  $4,29 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  pour les tranches pré-déshydratées.

Indépendamment du prétraitement et de la température de séchage,  $D_{eff}$  a augmenté à mesure que la teneur en humidité diminuait. Les coefficients de détermination étaient supérieurs à 0,99 dans les deux cas. Les valeurs obtenues dans cette étude se situent dans la plage de  $10^{-12}$  à  $10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s pour le séchage des aliments (Zielinska, 2016).

La diffusivité effective plus élevée pour les tranches pré-déshydratées indique que leur efficacité de transfert de masse était supérieure. Lorsque la déshydratation osmotique est commencée, un gradient de pression osmotique élevé existe entre les tranches et la solution d'immersion. Le sel pénètre dans les tranches de l'ail, endommageant les parois cellulaires et éventuellement les membranes cellulaires.

À mesure que ces structures se décomposent, la diffusion de l'eau dans les tissus végétaux devient plus facile et la diffusivité effective de l'eau augmente (Souza et al., 2007). De plus, plus la température est élevée, plus les valeurs de ( $D_{eff}$ ) sont élevées, car l'activité thermique des molécules d'eau augmente, ce qui accélère le transfert de l'eau de l'intérieur vers la surface des tranches de l'ail (Amami et al., 2017).

### 3.4. Énergie d'activation

L'énergie d'activation estimée à partir de l'équation d'Arrhenius est la quantité d'énergie requise pour éliminer l'humidité du matériau. Les valeurs étaient respectivement de 39,92 kJ/mol et 27,63 kJ/mol pour l'ail frais et pré-déshydraté. Les valeurs d' $E_a$  obtenues dans cette étude sont conformes à la plage de 12,7 kJ/mol à 110 kJ/mol rapportée pour divers aliments (Doymaz, 2011). Les valeurs plus faibles pour les tranches pré-déshydratées à la même température de l'air signifient que ce produit peut absorber une plus grande proportion de l'énergie d'entrée disponible, augmentant ainsi le taux de transfert de chaleur et de masse et diminuant le temps de séchage.

## Conclusion

L'étude de la cinétique de déshydratation osmotique des tranches de l'ail a montré que 15% de chlorure de sodium à 35°C était optimal en termes de perte d'eau, gain de solides et couleur des tranches de l'ail. Cette pré-déshydratation permet une diminution du temps de séchage et de la teneur finale en humidité. Bien que le temps requis pour obtenir des tranches d'ail séchées par convection soit plus court à 60°C, aider au séchage à 50°C par déshydratation osmotique a donné un meilleur produit final. De plus, cela a permis une augmentation de la diffusivité effective de l'eau.

Enfin, ces résultats sont pertinents pour l'industrie agroalimentaire car ils permettent une meilleure compréhension des processus physiques impliqués et pourraient conduire à des réductions de coûts et aux améliorations de la qualité du produit.



# **Partie Expérimentale**

## **Chapitre 4**

## Effet du champ électrique pulsé (CEP) sur le séchage de l'ail

### I. Effets du traitement (CEP) sur la membrane

#### Résumé

Le traitement par champ électrique pulsé (CEP), est une nouvelle technologie qui a un effet d'électroporation sur les cellules. L'intérêt majeur du traitement (CEP) sur les tissus biologiques, découle de ses applications non thermiques pour induire une perméabilité cellulaire accrue. Le but de cette étude était d'étudier l'étendue de la perméabilisation de la membrane cellulaire des tranches de l'ail due à l'application du champ électrique pulsé. L'impact des paramètres du CEP sur la membrane cellulaire a été basé sur l'estimation de la variation de l'indice de désintégration  $Z$  et l'observation des tranches de l'ail sous microscope électronique à balayage. Les effets du CEP sur la couleur des tranches de l'ail ont été étudiés.

Les résultats expérimentaux ont été obtenus pour les tranches de l'ail traités avec des intensités de champ de  $E \approx 500, 1000$  et  $1500$  V/cm, une largeur d'impulsion de  $t_i = 450 \mu s$ , une fréquence de  $f = 10$  Hz et le nombre d'impulsions,  $n = 10$  à  $200$ .

Les membranes des cellules de tranches de l'ail ont été significativement affectées par le traitement au CEP à des intensités  $\geq 1000$  V/cm. L'augmentation de la conductivité du milieu et l'indice  $Z$  cellulaire sont liées à l'augmentation des intensités et des impulsions. Une rupture irréversible des cellules s'est produite à  $1500$  V/cm.

L'observation par microscopie électronique à balayage a révélé une formation des pores dans la membrane plasmique après le traitement au CEP. Le jaunissement des tranches de l'ail a augmenté avec l'augmentation des intensités électriques.

**Mots clés:** Ail, Champ électrique pulsé, Indice de désintégration, Microscope électronique à balayage.

### 1. Introduction

Le traitement de champs électriques pulsés (CEP) est une nouvelle technique de traitement des aliments non thermique (**Semenoglou et al., 2020**). Le CEP est utilisé pour la plasmolyse non thermique des membranes biologiques en raison de sa capacité à induire une perméabilité et une rupture cellulaire accrues. L'électroplasmolyse des membranes cellulaires est utilisée pour la pasteurisation des liquides et pour améliorer les processus basés sur le transfert de chaleur et de masse tels que le pressage, la diffusion, la déshydratation osmotique et le séchage (**Bazhal et al., 2003**).

Le traitement par champ électrique pulsé (CEP) applique des impulsions très courtes ( $\mu s$ ) de forte intensité de champ électrique ( $0,1$  à  $40$  kV/cm) à un produit placé entre deux électrodes. Ceci conduit à la perméabilisation des membranes cellulaires (**Liu et al., 2019**).

Le traitement CEP induit une instabilité et une tension locales dans la membrane cellulaire en raison de la compression électromécanique et favorise la formation de pores dans la membrane. La dégradation électrique des membranes cellulaires augmente la perméabilité, la conductivité électrique, la diffusion, les coefficients de transfert de chaleur et de masse et de la compressibilité des tissus végétaux et facilite le passage des composés intracellulaires vers la solution environnante.

Le traitement CEP est caractérisé par une perméabilisation réversible ou irréversible, qui est déterminée par les conditions de traitement.

La perméabilisation réversible peut induire des changements dans la réponse métabolique. Elle augmente la production des métabolites secondaires tels que les composés phénoliques et le phytostérol, et en augmentant finalement l'activité antioxydante (**Bazhal et al., 2003; Kim et al., 2019**).

La perméabilité irréversible permet des améliorations significatives du transfert de masse au cours de divers processus tels que le séchage (**Parniakov et al., 2016**), la concentration et l'extraction (**Guderjan et al., 2007**), ce qui se traduit par des meilleurs rendements de production et un temps de traitement plus court.

L'observation des changements microstructuraux permet d'expliquer l'augmentation de la perméabilisation et le ramollissement des tissus induits par le traitement au CEP. Le microscope électronique à balayage (MEB) a également été utilisé pour visualiser les changements induits par le CEP aux niveaux de la membrane cellulaire.

À ce jour, les études ont montré que les réponses des matières végétales solides, telles que les coupes d'oignons (**Fincan et Dejmek, 2002**), les pommes de terre (**Faridnia et al., 2015**) et les patates douces (**Liu et al., 2017**), au CEP sont très variables. Ses effets sur les différents organes/tissus végétaux sont souvent inégaux et difficiles à prévoir. Les organes végétaux sont constitués de différents types de cellules et de tissus aux propriétés physiques, chimiques et électriques variables, qui peuvent tous influencer à la fois sur leur conductivité et leur sensibilité à l'électroporation induite par le CEP.

Cependant, aucune étude n'a examiné l'effet des différentes intensités de champ électrique sur la membrane des tranches de l'ail, en particulier en termes de désintégration membranaire, texture et couleur.

L'objectif de cette étude était d'étudier:

1. La mesure du degré d'indice de désintégration cellulaire ( $Z$ ) basée sur l'étude de la cinétique de la conductivité électrique des tranches de l'ail lors du traitement du CEP.
2. Visualisation au microscope électronique à balayage des changements dans les tissus des tranches d'ail avant et après traitement avec CEP.
3. L'influence de l'électroplasmolyse sur les changements de couleur des tranches de l'ail.

## 2. Matériels et méthodes

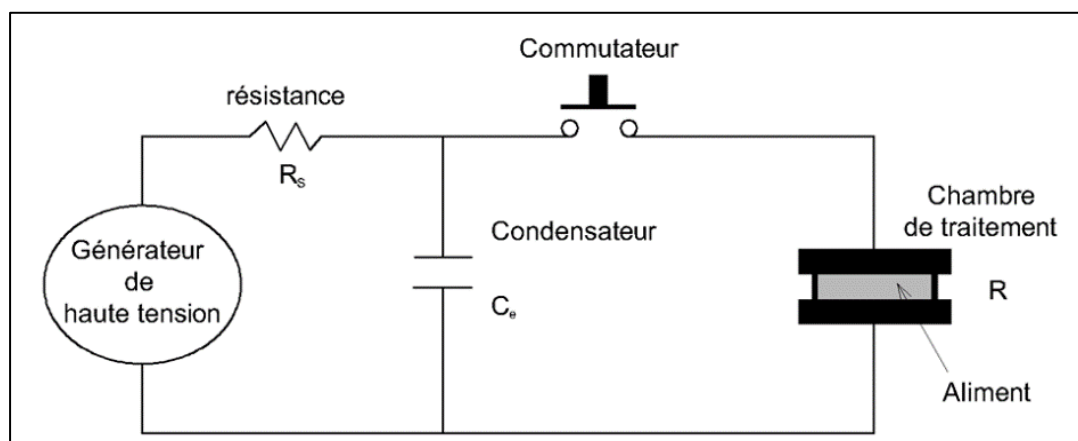
### 2.1. Matière végétale

L'ail (*Allium sativum* L., El-Hamra) a été récolté à Harrouche, un village de Skikda, province, à l'est de l'Algérie. Les bulbes d'ail ont été stockés dans un endroit sec à température ambiante (20°C) jusqu'à l'utilisation. Les bulbes ont été séparés en gousses, pelés puis tranchés en morceaux uniformes de 2 mm d'épaisseur.

La teneur en humidité des échantillons a été déterminée par séchage dans une étuve à vide (Binder DV53, Francfort, Allemagne) à 70°C pendant 24h selon la méthode de l'Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 2010). La teneur en humidité initiale des échantillons d'ail était de  $63 \pm 0,5\%$  (w/b).

## 2.2. Champs électriques pulsés (CEP)

Le traitement par champ électrique pulsé (CEP) a été effectué dans un système CEP discontinu (Science Food Laboratory, Département de génie des bioressources, Université McGill, Canada). L'équipement a été appliqué à l'aide d'un générateur CEP qui produisait des impulsions de forme d'onde à décroissance exponentielle. Le traitement a été réalisé dans une chambre de traitement avec deux disques parallèles aux électrodes inoxydables. Les échantillons ont ensuite été traités à aux différentes intensités CEP (500, et 1500V/cm). Les impulsions ont été contrôlées en ligne à l'aide d'un oscilloscope. La durée  $t_i$  des impulsions exponentielles était d'environ 450 $\mu$ s et la fréquence était de 10 Hz pour toutes les expériences. La température d'entrée de la chambre de traitement CEP était d'environ 20°C et l'augmentation de la température de sortie due au traitement CEP ne dépassait pas 3°C.



**Figure 28:** Schéma d'un système du champ électrique pulsé.



**Figure 29:** Installation du champ électrique pulsé.

### 2.3. Conductivité

La conductivité a été mesurée avec un compteur LCR (Philips PM6303 RCL à 4 chiffres, Eindhoven). Deux électrodes étaient situées dans les deux côtés de la chambre de traitement à l'intérieur de l'échantillon.

Au cours du traitement CEP, l'évolution de la résistance des échantillons a été enregistrée en utilisant le même compteur LCR. Après avoir converti la résistance en conductivité, les résultats ont ensuite été utilisés pour déterminer l'indice de perméabilisation (equation11):

$$\sigma = A/R_p \quad (11)$$

«A» est la surface du produit en contact avec les électrodes (m<sup>2</sup>); «R<sub>p</sub>» est la résistance des tranches de l'ail après un nombre d'impulsions donné (Ω)

La conductivité relative a été calculée

$$\sigma = \sigma_f/\sigma_i \quad (12)$$

«σ<sub>f</sub>» est la conductivité mesurée après un nombre d'impulsions S/cm, «σ<sub>i</sub>» est la conductivité mesurée après la première impulsion S/cm (**Patricio, 2003**).

### 2.4. Détermination de la désintégration cellulaire

**Rogov and Gorbatov (1974)**; a établi une méthode pour déterminer l'influence des champs électriques sur les matériaux alimentaires. Ils ont défini l'indice de désintégration Z pour la description de la désintégration cellulaire. Il a également été appliqué avec succès par **Asavasanti et al., (2010)**; pour quantifier l'effet de différentes intensités de champ électrique sur la rupture cellulaire du tissu de l'oignon. Dans ce modèle, l'indice de désintégration Z est calculé sur la base de la conductivité de l'échantillon intact, complètement désintégré et de l'échantillon traité au CEP mesuré à basse fréquence. Le calcul est indiqué dans l'équation 13:

$$Z = \frac{\sigma - \sigma_i}{\sigma_d - \sigma_i} \quad (13)$$

Les indices «I» et «d» se réfèrent respectivement aux valeurs mesurées des échantillons non traités (intacts) et complètement endommagés. Toutes les valeurs ont été mesurées à la même température, T= 20. L'application des équations ci-dessus donne «Z = 0» pour les échantillons non traités et «Z= 1» pour les échantillons complètement endommagés (**Pieter et al., 2012**).

### 2.5. Microscopie électronique à balayage

Pour étudier l'effet du traitement CEP sur les cellules; les tranches de l'ail ont été séparés en des tranches non traités et traités au CEP. La morphologie et l'organisation des cellules ont été étudiées par microscopie électronique à balayage Hitachi TM-3000 (Tokyo, Japon) fonctionnant à 15 kV et à température ambiante. Dans chaque expérience, 15 images de trois échantillons différents ont été analysées et des photographies typiques ont été sélectionnées.

## 2.6. Détermination de couleur

La couleur d'un produit alimentaire est l'un des facteurs de qualité les plus importants. Le changement de couleur dans les échantillons a été déterminé à l'aide d'un chromomètre (MINOLTA CR-300X, Japon) en termes de  $L^*$  (blancheur / obscurité),  $a^*$  (rougeur / verdure),  $b^*$  (jaunissement/ bleuissement) et différence de couleur ( $\Delta E$ ). La couleur mesurée a été exprimée par la valeur du changement de couleur total selon l'équation (8):

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2} \quad (8)$$

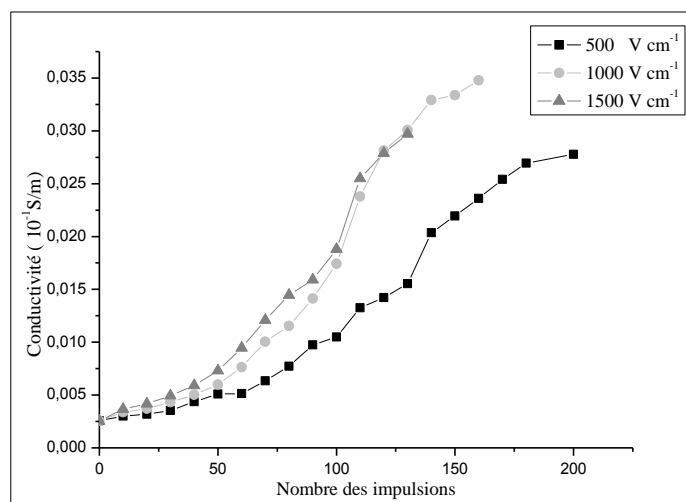
«  $\Delta E$  » indique le degré de changement de couleur global d'un échantillon prétraité par rapport aux valeurs de couleur d'un échantillon non prétraité.

## 3. Résultats et discussion

### 3.1. Conductivité électrique des échantillons traités par CEP

Le traitement CEP fournit une haute tension sous forme des impulsions électriques courtes. Ce traitement induit une instabilité et une tension locales dans la membrane cellulaire en raison de la compression électromécanique et favorise la formation de pores dans la membrane. La dégradation électrique des membranes cellulaires augmente la perméabilité et facilite le passage des composés intracellulaires vers l'extracellulaire (Kim et al., 2019).

La méthode bien connue d'estimation des dommages de structure cellulaire est basée sur les mesures de conductivité électrique (CE). Le changement de CE en fonction de nombre des impulsions aux différentes intensités du champ appliquée est représenté dans la figure 30.



**Figure 30:** Relation entre la conductivité électrique et nombre des impulsions des tranches de l'ail traitées au CEP.

Les tranches non traité ont montré une conductivité électrique très faible ( $0.00255 \times 10^{-1}$  S/m), indiquant que les membranes cellulaires étaient intactes et que peu de matière ionique s'était infiltrée. Par contre, les tranches de l'ail traitées aux CEP avaient une conductivité élevée ( $0.0050 \times 10^{-1}$  à  $0.0279 \times 10^{-1}$  S/m). Cette augmentation de conductivité électrique montre que le traitement au CEP a entraîné une rupture de la membrane cellulaire biologique (**Fauster et al., 2019**). Ceci indique que les matériaux ioniques intracellulaires étaient libérés plus rapidement à travers les membranes cellulaires perturbées. Cette constatation est cohérente avec celles d'une étude précédente sur le poivron rouge traité au CEP (**Won et al., 2015**).

Il est bien connu que le tissu végétal peut être considéré comme un électrolyte du fait qu'il contient des substances capables d'accumuler la charge électrique. L'application de CEP entraîne l'électroporation, dépend de la perforation de la membrane cellulaire. La libération de contenu intercellulaire (qui se compose d'ions et d'autres particules chargées) entraîne une modification des propriétés électriques des tissus. Par conséquent, l'efficacité de l'électroporation peut être évaluée au moyen de la mesure de la conductivité électrique (CE) (**Wiktor et al., 2015**).

Les changements de conductivité électrique est le résultat de l'augmentation de la conductivité membranaire due à la poration et à la rupture ultérieure des cellules (**Ade-Omowaye et al., 2003**). En augmentant l'intensité et le nombre des impulsions, les valeurs de conductivité électrique ont augmenté en raison de la diminution de la résistance de la membrane cellulaire lors du passage du courant appliqué (**Bot et al., 2018**).

À des petites valeurs de E (500 et 1000V/cm), le dommage de la membrane plasmique induit par le CEP est réversible et les cellules peuvent revenir à leur état physiologique normal (**Bazhal et al., 2003**). À des grandes valeurs de E (1500 V/cm), les valeurs de conductivité élevées indiquaient l'électroporation irréversible sur membrane.

Et celle-ci a confirmé par l'étude de **Fincan et Dejmek (2002)**; où ils ont montré que les changements intracellulaires pour le traitement au CEP à 0,35 et 0,52 kV/cm, entraîne un changement plus graduel dans l'espace extracellulaire. Cela confirme le changement dans le milieu intracellulaire a débuté et que les changements dans le milieu extracellulaire ont suivi.

**Kim et al., (2019)**; a confirmé par le test de lixiviation ionique de ginseng que la perméabilisation de la membrane des cellules de ginseng augmente avec la force du champ électrique appliqué.

### 3.2. Indice de désintégration cellulaire (Z)

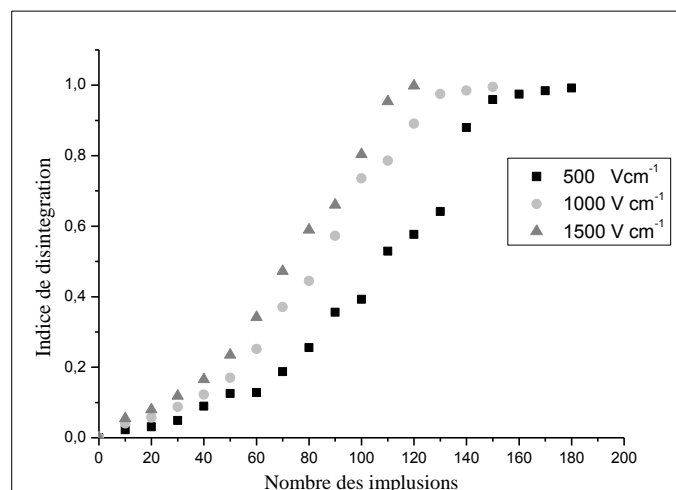
L'indice de désintégration cellulaire (Z) est un indice quantitatif communément accepté de l'étendue de l'électroporation puisqu'il reflète les changements microstructuraux (**Janositz et Knorr, 2010**). Il est couramment utilisé pour évaluer les effets de différents paramètres CEP appliqués sur l'aliment à fin de sélectionner les conditions optimales (**Dermesonlouoglou et al., 2018**).

Les valeurs  $Z$  sont calculées en utilisant l'équation (13) avec des valeurs de conductivité électrique (figure 31).

Les résultats montrent que le degré de perméabilisation dépend principalement de l'intensité du champ électrique et nombre des impulsions. En augmentant l'intensité du champ de (500, 1000 et 1500 V/cm), la valeur  $Z$  a augmenté de manière significative ( $p < 0,05$ ) de 0,2 à 0,9 et leur valeur maximale est atteinte à  $Z = 1$ .

Des valeurs de  $Z$  plus faibles ont indiqué que les tissus étaient intacts pour les tranches de l'ail non traités. Cependant, les tranches de l'ail traitées à 500V/cm et 1000V/cm présentent de  $Z$  élevées ce qui indique que les tissus étaient partiellement rompus. Par contre, pour  $Z = 1,0$ ; les tranches traitées à une intensité de 1500V/cm et les échantillons de congélation-décongélation, indique une rupture totale de la membrane cellulaire.

Ces résultats donnent une indication que la modification de la membrane cellulaire a effectivement eu lieu à la suite du traitement. Selon la littérature, les traitements au CEP peuvent entraîner la formation de pores dans la membrane (**Janositz et Knorr, 2010**).



**Figure 31:** Indice de désintégration cellulaire des tranches de l'ail Prétraités au CEP liés aux différents nombre d'impulsion.

Dans le cas, les valeurs de l'indice  $Z$  ne dépassaient pas 0,2, indique que l'intensité du champ électrique appliquée pouvait entraîner un faible niveau de dommages. L'augmentation de l'indice de  $Z$  est strictement liée au ramollissement des tissus comme indiqué par **De Vito et al., (2008)**. Les auteurs ont observé qu'à  $Z$  jusqu'à 0,2, la fermeté du tissu était similaire à celle des échantillons non traités. L'augmentation de l'indice de désintégration à 0,5 ou plus a favorisé un ramollissement élevé des tissus.

Cette constatation était cohérente avec **Urszula et al., (2016)**; qui ont observé que  $Z$  augmente avec l'augmentation de l'intensité du champ électrique et du nombre d'impulsions dans les carottes, les pommes de terre et les pommes. **Loginova et al., (2011)**; ont rapporté que les valeurs  $Z$  pour la



betterave rouge augmentaient à mesure que l'intensité du champ électrique augmentait de 375 à 1500 V/cm aux différentes durées de traitement électrique (0–0,1s); les valeurs Z pour les échantillons traités à 375 et 1500 V/cm étaient respectivement de 0,6 et 0,9 pour une durée de traitement de 0,1 s.

Ainsi dans une autre étude, **Lebovka et al., (2014)**; ont montré que les valeurs expérimentales et simulées de Z de la pomme de terre dans les tissus étaient comprises entre 0 et 0,8.

Pour la plupart des tissus végétaux tels que les pommes, les raisins, les pommes de terre, les betteraves à sucre et les oignons, des valeurs de Z supérieures à 0,8 ont été obtenues à l'aide de champs  $\geq 3$  kV/cm (**Dermesonlouoglou et al., 2018**).

Sur la base des valeurs mesurées de Z, les conditions expérimentales CEP ont été fixés à nombre d'impulsion 90 aux intensités de champ (500, 1000 et 1500 V/cm) pour conduisant à un degré de désintégration cellulaire 0.37; 0.5 et 0.8 respectivement. Le but était d'évaluer l'effet de désintégration cellulaire sur le processus de séchage.

### 3.3. Microscope électronique à balayage

Pour mieux comprendre l'effet du traitement de CEP au niveau des membranes des cellules, nous avons utilisé la microscopie électronique à balayage (MEB). Les images au MEB obtenu les tranches de l'ail échantillons non traités et traités au CEP sont présentées à la figure (32).

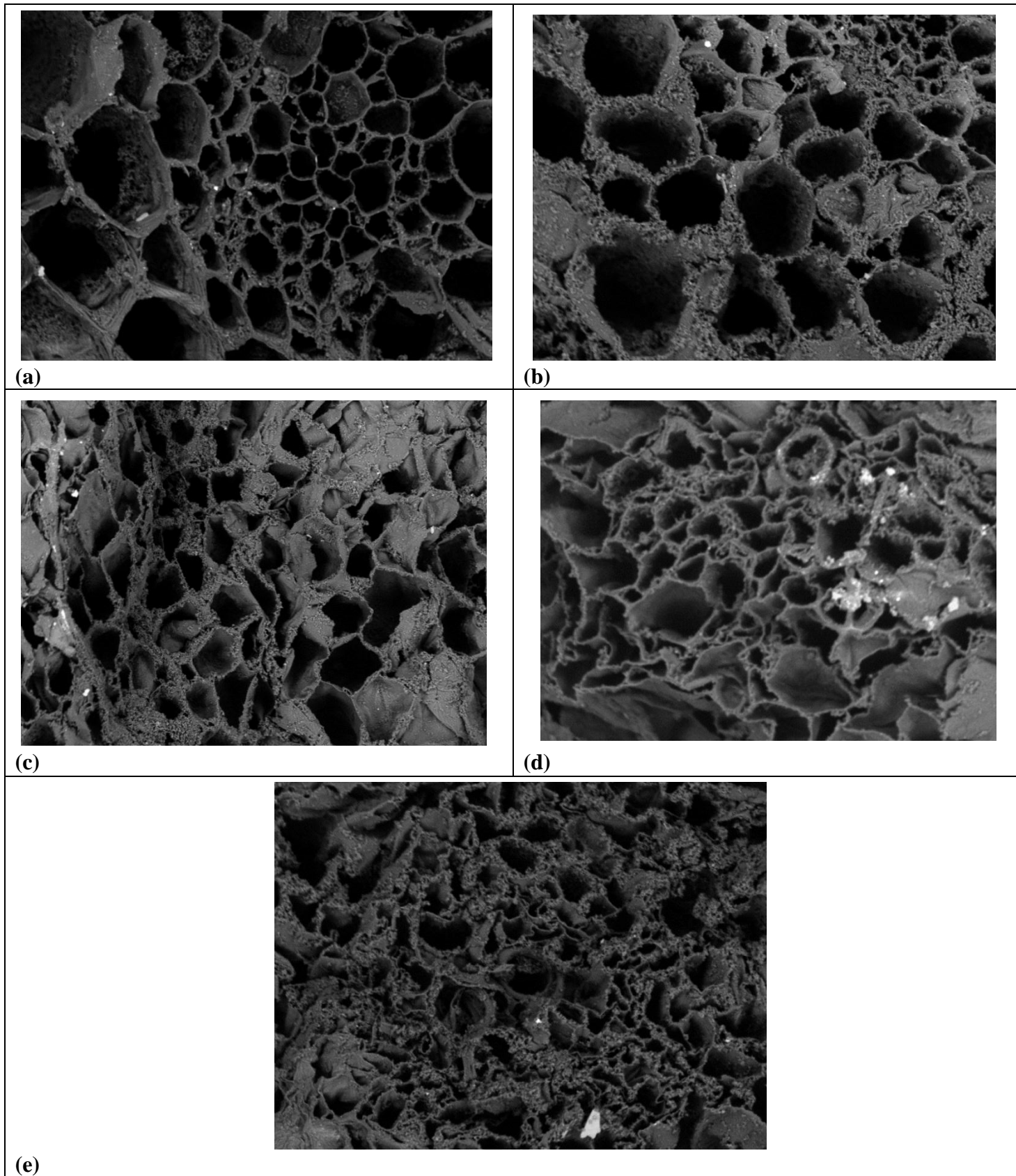
Les régions lumineuses sur la micrographie sont principalement la membrane cytoplasmique et les parois cellulaires; les régions les plus sombres sont des trous où le contenu de la cellule était auparavant.

Pour les tranches de l'ail non traitées, présentaient des cellules isodiamétriques de forme régulière sans dommages ni pores. Après avoir subi le traitement au CEP, les cellules sont apparues déchirées et de forme irrégulière, ce qui indique la présence de rupture et de fragilité des parois cellulaires (**Bchir et al., 2012**).

Le CEP a entraîné des modifications notables de la structure du tissu (Figure 34 b, c et d). Il avait une différence entre les tranches de l'ail non traités et traités au CEP. La surface est devenue plus rugueuse. La désintégration induite par le CEP a entraîné un ramollissement notable des tissus (**Ben Ammar et al., 2010**).

L'interaction entre la cellule et le champ électrique produira la formation de pores dans la paroi cellulaire qui permettra l'échange libre de composants de l'intérieur de la cellule avec le milieu environnant (**Fazaeli et al., 2012**).

Dans une autre étude sur l'extraction de colorants à partir d'écorces de figes de Barbarie, une microscopie électronique a révélé des pores sur des surfaces cellulaires prétraitées au CEP (**Koubaa et al., 2016**). Cependant, la structure des tissus d'agrumes flavedo et albedo est assez uniforme, la partie flavedo contient des pores dilatés, alors que les cellules d'albedo sont plus grosses que celles de flavedo (**El Kantar et al., 2018**).



**Figure 32:** Micrographies électroniques à balayage des tranches de l'ail:

**a)** non traité, **b)** traité au CEP (500V/cm), **c)** traité au CEP (1000V/cm),  
**d)** traité au CEP (1500V/cm) et **e)** congelé-décongelé.

### 3.4. Effet du CEP sur la couleur

La mesure de la couleur est l'une des plus importantes dans l'évaluation de la qualité du produit. Les coordonnées de couleur des tissus de tranches de l'ail traitées et non traitées aux CEP ont été déterminées pour étudier l'impact du CEP sur la qualité directement après l'application du CEP afin d'évaluer leur utilité technologique. Les paramètres de couleur des différents échantillons sont présentés dans le tableau 14.

Les tranches de l'ail non traitées ont été caractérisées par une légèreté  $L^*$  égale à  $63.8 \pm 0,75$ , une valeur de  $a^*$   $0.4 \pm 0,53$  et un jaunissement  $b^*$   $16.2 \pm 1,14$ .

Les valeurs de légèreté ( $L^*$ ) et les valeurs de ( $a^*$ ) n'ont montré aucun changement significatif après tout traitement au CEP, ils ont été caractérisées par des valeurs similaires à l'échantillon non traité. Par contre, le CEP a entraîné une augmentation des valeurs de  $b^*$  (augmentation du jaunissement). Cela pourrait être attribué à la libération de ses substrats après électroporation.

L'impact du CEP sur la couleur peut avoir un double effet. D'un côté, il provoque des fuites de contenu intracellulaire et améliore l'activité de certaines enzymes, mais de l'autre, il inactive également certaines enzymes permettant une meilleure rétention de la couleur (**Velickova et al., 2018**). En raison de ce caractère complexe de l'électroporation, l'impact du CEP sur la couleur n'est pas bien clair.

Dans certaines études l'électroporation provoque la fuite de contenu intercellulaire et l'activité de certaines enzymes serait renforcée, des changements de couleur ont été signalés pour la pomme (**Grimi et al., 2010; Wiktor et al., 2014**), les asperges blanches (**Janositz et al., 2011**) et les bleuets (**Yu et al., 2018**); qui ont été soumis au traitement CEP. Dans autres études, où le CEP peut inactiver les enzymes qui peuvent inhiber le changement de couleur, aucun changement de couleur n'a été signalé pour l'extrait de thé vert (**Zhao et al., 2008**), les cerises rouges (**Sotelo et al., 2018**), le jus de carotte et de tomate (**Odrizola-Serrano et al., 2009**) qui ont été soumis à un traitement CEP. Le changement des paramètres optiques de l'aliment par application de CEP dépend fortement des propriétés du matériau et des conditions de traitement (**Wiktor et al., 2015**).

La différence de couleur totale  $\Delta E$  des tranches de l'ail traitées au CEP décrit les changements par rapport à la couleur des tranches non traité. Des changements plus importants de  $\Delta E$  ont été observés dans les tranches de l'ail traitées avec CEP, ont été caractérisés par des valeurs élevées (3.08-4.33). Les valeurs de  $\Delta E$  supérieures à 2 indiquent qu'un tel changement de couleur pourrait être visible à l'œil nu par un consommateur (**Wiktor et al., 2015**).

**Tableau 14:** Effets du prétraitement CEP sur la couleur des tranches d'ail.

Echantillon	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta E$
<b>Controle</b>	63.8±0.75	1.4±0.53	16.2±1.14	3.08±1.25
<b>500V/cm</b>	64.21±1.10	1.42±2.03	19.26±2.01	3.67±1.38
<b>1000V/cm</b>	64.3±0.85	1.45±1.06	19.84±1.03	4.33±1.64
<b>1500V/cm</b>	65.06±1.45	1.45±0.24	20.35±1.16	3.08±1.95

### Conclusion

Le traitement CEP a augmenté la perméabilisation de la membrane cellulaire des tranches de l'ail d'une manière qui dépend de l'intensité du champ électrique appliqué et nombre des impulsions.

Les résultats rapportés dans cette étude suggèrent que l'intensité du champ électrique était le variable le plus influente dans la conductivité du milieu.

L'indice de désintégration  $Z$  est proposé pour l'estimation de l'efficacité de l'intensité et nombre d'impulsion lors du traitement par CEP. Il a été montré que la dépendance des valeurs de  $Z$  au nombre des impulsions et les intensités électriques appliquées passe par  $Z=1$ , ce qui correspond à l'efficacité maximale de l'intensité et se situe dans la plage de la désintégration

L'observation microscopique par MEB a révélé la formation des pores au niveau des membranes plasmiques après le traitement au CEP.

Dans de telles conditions, la couleur a été maintenue, mais une augmentation du jaunissement s'est produite en raison de l'électroperméabilisation et de la perturbation cellulaire favorisée par les conditions de CEP les plus intenses. Par conséquent, le traitement CEP pourrait être proposé comme prétraitement avant séchage des tranches de l'ail.

## *Effet du champ électrique pulsé (CEP) sur le séchage de l'ail*

### *II. Effet du CEP sur les tranches d'ail séché aux microondes assistées à l'air chaud*

#### **Résumé**

Les effets des champs électriques pulsés (CEP) sur le séchage au micro-ondes assisté à l'air chaud (SMAC) des tranches d'ail ont été étudiés. Le traitement CEP a été effectué en utilisant des intensités de champ électrique de 500 1000 et 1500 V/cm. Le séchage au micro-ondes assisté à l'air chaud a été réalisé à une puissance de 100W, aux différentes températures (50, 60 et 70°C). Les échantillons traités ont été analysés par microscopie électronique à balayage. La cinétique de séchage a été modélisée. Le prétraitement du CEP a provoqué une perméabilisation des tissus avec un indice de désintégration de la conductivité électrique (Z) allant jusqu'à 0,60.

Le prétraitement au CEP a amélioré les taux de séchage des échantillons de tranches d'ail. Deux termes, Henderson et Pabis et Midilli et *al.* les modèles donnent la valeur moyenne la plus élevée de  $R^2$  (0,9902 à 1) et les valeurs les plus faibles de  $\chi^2$  (6,04856E-05 à 0,00077358) et RMSE (0,0010212 à 0,00819718). Les coefficients de diffusion des échantillons d'ail prétraités CEP ont augmenté jusqu'à 36%. Les tranches d'ail traitées se caractérisent par une texture plus dure et une couleur légèrement plus foncée. De plus, l'application de CEP avant le séchage a eu un effet positif sur la conservation de la teneur en composés phénoliques totaux et l'activité antioxydant dans les tranches d'ail séchées.

**Mots clés :** Ail, Champ électrique pulsé, Indice de désintégration, Séchage au microonde assisté à l'air chaud.

#### **1. Introduction**

L'ail (*Allium sativum* L.) est l'une des espèces les plus importantes du genre *Allium*, étant un légume très important sur le plan économique avec une production annuelle de plus de 22 millions de tonnes. Bien que l'espèce soit originaire d'Asie centrale, elle est largement distribuée et bien adaptée dans tout le bassin méditerranéen (**Petropoulos et al., 2017**). Il contient de l'eau (62-68%), des glucides (26-30%), des protéines (1,5-2,1%), des acides aminés (1-1,5%), des composés organosulfurés (1,1-3,5%) et des fibres (1,5%), tous basés sur le poids frais (**Xiaoming Lu et al., 2018**).

La principale caractéristique de qualité des produits à base d'ail est la saveur distincte, en raison de ses réactions biochimiques complexes potentielles donnant des résultats positifs (**Martins et al., 2016**). Communément utilisé à des fins culinaires, l'ail est également très apprécié en raison de ses propriétés thérapeutiques et médicinales, à la fois en médecine traditionnelle et moderne. Étant consommé soit comme légume cru (feuilles fraîches ou clous de girofle séchés), soit après traitement sous forme d'huile essentielle, d'extrait et même de poudre, des différences marquées dans la composition chimique sont réalisables (**Martins et al., 2016**).

Plus récemment, il a trouvé des utilisations sous sa forme séchée, comme ingrédient des aliments précuits; y compris les sauces, et les soupes. Cela a entraîné une forte augmentation de la demande d'ail séché (**Tao et al., 2018**). Par conséquent, une grande partie des composants aromatiques de l'ail peut être perdue pendant le séchage. L'ail étant très sensible à la température, choisir la bonne méthode de séchage est la clé d'une opération réussie (**Cui et al., 2007**).

Ces dernières années, le séchage par micro-ondes a été étudié comme une méthode potentielle pour obtenir des aliments séchés de haute qualité. Le séchage par micro-ondes est rapide et économe en énergie par rapport au séchage à air chaud conventionnel (**Cui et al., 2007**).

En raison de la distribution non uniforme du champ électromagnétique pendant le séchage par micro-ondes, les matériaux à sécher doivent être tournés dans la cavité pour éviter tout point chaud. Étant donné que seule une quantité limitée d'eau est disponible au cours des dernières étapes du processus de séchage, la température des denrées alimentaires est facile à augmenter et difficile à contrôler, donc le séchage à l'air par convection est un autre moyen de surmonter l'inconvénient des points chauds.

La combinaison du séchage par micro-ondes et l'air chaud est une alternative potentielle pour obtenir des produits déshydratés de haute qualité (**Cui et al., 2007**). Par conséquent, dans cette étude, la combinaison du séchage par micro-ondes et du séchage par air chaud par convection est utilisée pour sécher des tranches d'ail comme exemple pour démontrer la faisabilité d'utiliser le séchage combiné par micro-ondes sous vide et à air chaud pour obtenir des produits déshydratés de haute qualité.

Par conséquent, une exposition prolongée du produit à une température élevée de l'air de séchage entraîne une dégradation substantielle de la qualité du produit séché, à savoir la couleur, la saveur, le goût et les nutriments (**Sharma et al., 2009**). L'approche actuelle de l'industrie de transformation des aliments pour produire des aliments déshydratés a été centrée sur l'amélioration du taux de séchage, mais une importance est également accordée à la réduction de la consommation d'énergie et à la minimisation de la dégradation thermique des constituants alimentaires (**Priyanka et Saleem, 2014**). L'ail doit être traité rapidement et de manière optimale pour maintenir la qualité (**Sharma et Suresh, 2006**).

Un certain nombre de prétraitements peuvent être appliqués en fonction de l'aliment à sécher, de son utilisation finale et de sa disponibilité (**Adedeji et al., 2008**). Diverses méthodes de prétraitement, qui réduisent le temps de séchage, comprennent le prétraitement chimique, le blanchiment, la déshydratation osmotique et les pulsations champ électrique (**Bae et al., 2014**).

Le champ électrique pulsé (CEP) est l'un des prétraitements non thermique les plus prometteurs pour améliorer la qualité pendant la déshydratation. Le CEP est considéré comme supérieur au traitement thermique traditionnel des aliments car il réduit considérablement les changements néfastes des propriétés sensorielles et physiques des aliments. Le prétraitement par champ électrique pulsé a le potentiel de réduire la consommation d'énergie et de minimiser la dégradation thermique (**Priyanka et Saleem, 2014**).

L'intérêt majeur pour le traitement par champ électrique pulsé (CEP) des matériaux cellulaires provient de ses applications non thermiques pour induire une perméabilité cellulaire accrue (**Bazhal**

et *al.*, 2003). Le traitement du champ électrique pulsé (CEP) implique de soumettre les aliments, placé entre deux électrodes, à des champs électriques puisés à haute tension pendant un temps très court ( $\mu\text{s}$  à  $\text{ms}$ ), ce qui conduit à une perméabilisation des membranes cellulaires.

De nombreux facteurs, à savoir l'intensité du champ électrique, le nombre d'impulsions, la composition de l'aliment et le type de forme d'onde d'impulsion, influencent l'efficacité de la méthode (Dev et *al.*, 2011). Avec des intensités de champ électrique ou un nombre d'impulsions suffisamment élevés, le traitement au CEP provoque une rupture de la membrane dans les cellules (c'est-à-dire une électroporation) et accélère par conséquent le taux d'élimination de l'eau (Asavasanti et *al.*, 2010).

La méthode d'estimation du degré d'endommagement des cellules est basé sur des mesures de conductivité électrique. La conductivité électrique est élevée pour des cellules endommagées, et la conductivité électrique moyenne augmente à mesure que le degré de dommage augmente.

La mesure du degré d'index de désintégration cellulaire ( $Z$ ) et des changements de conductivité dus à la libération et au transport d'espèces ioniques dues à la formation de pores a été utilisée pour confirmer l'efficacité de la perméabilisation des membranes induite par le CEP. Cependant, l'utilisation d'un microscope électronique à balayage (MEB) est de visualiser l'effet du CEP sur les dommages microstructuraux. Le traitement par le CEP a été étudié dans une grande variété de tissus végétaux, notamment la pomme de terre, la carotte, la pomme, la betterave sucrière et l'oignon (Asavasanti et *al.*, 2010); dans chaque cas, il a été montré que l'augmentation de l'intensité du champ électrique ou du nombre d'impulsions augmente l'efficacité de la perméabilisation (Asavasanti et *al.*, 2010). D'autres résultats positifs ont été obtenus pour les tranches de pomme, la mangue et les poivrons (Marani et *al.*, 2007).

La modélisation mathématique du processus de séchage est très importante en raison des mécanismes simultanés de transfert de chaleur et de masse. De nombreux matériaux alimentaires tels que les oignons, les carottes et les tomates, en raison de leur nature, sont souvent coupés en fines tranches et fréquemment séchés sous la forme d'une couche de particules d'échantillon appelée séchage en couche mince (Abano et *al.*, 2011). Les modèles de séchage en couche mince décrivant le phénomène de séchage des matériaux agricoles ont été classés en modèles théoriques, semi-théoriques et empiriques (Younis et *al.*, 2018).

Cependant, peu des études ont examiné l'effet du champ électrique pulsé sur les tranches d'ail. Par conséquent, les objectifs de ce travail étaient:

- Mesure du degré d'indice de désintégration cellulaire ( $Z$ ) sur la base de l'étude de la cinétique de la conductivité électrique des tranches de l'ail lors du traitement du CEP.
- Visualisation au microscope électronique à balayage des changements dans les tissus des tranches d'ail avant et après traitement avec CEP.

- Étudier l'effet du prétraitement CEP sur le séchage des tranches d'ail pour étudier les caractéristiques de séchage et la qualité des tranches d'ail séchées en termes de texture et de couleur.
- Déterminer les modèles qui correspondent le mieux aux résultats obtenus.

## 2. Matériels et méthodes

### 2.1. Matière végétale

L'ail (*Allium sativum* L., El-Hamra) a été récolté à Harrouche, un village de Skikda, province, à l'est de l'Algérie. Les bulbes d'ail ont été stockés dans un endroit sec à température ambiante (20°C) jusqu'à l'utilisation. Les bulbes ont été séparés en gousses, pelés puis tranchés en morceaux uniformes de 2 mm d'épaisseur. La teneur en humidité des échantillons a été déterminée par séchage dans une étuve à vide (Binder DV53, Francfort, Allemagne) à 70°C pendant 24h selon la méthode de l'Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 2010). La teneur en humidité initiale des échantillons d'ail était de  $63 \pm 0,5\%$  (w/b).

### 2.2. Champs électriques pulsés (CEP)

Le traitement par champ électrique pulsé (CEP) a été effectué dans un système CEP discontinu (Science Food Laboratory, Département de génie des bioressources, Université McGill, Canada). L'équipement a été appliqué à l'aide d'un générateur CEP qui produisait des impulsions de forme d'onde à décroissance exponentielle. Le traitement a été réalisé dans une chambre de traitement avec deux disques parallèles aux électrodes inoxydables. Les échantillons ont ensuite été traités à aux différentes intensités CEP (500, et 1500V/cm). Les impulsions ont été contrôlées en ligne à l'aide d'un oscilloscope. La durée  $t_i$  des impulsions exponentielles était d'environ 450 $\mu$ s et la fréquence était de 10 Hz pour toutes les expériences (figure 34). La température d'entrée de la chambre de traitement CEP était d'environ 20°C et l'augmentation de la température de sortie due au traitement CEP ne dépassait pas 3°C.

### 2.3. Conductivité

La conductivité a été mesurée avec un compteur LCR (Philips PM6303 RCL à 4 chiffres, Eindhoven). Deux électrodes étaient situées dans les deux côtés de la chambre de traitement à l'intérieur de l'échantillon.

Au cours du traitement CEP, l'évolution de la résistance des échantillons a été enregistrée en utilisant le même compteur LCR. Après avoir converti la résistance en conductivité, les résultats ont ensuite été utilisés pour déterminer l'indice de perméabilisation (equation 11):

$$\sigma = A/R_p \quad (11)$$

«A» est la surface du produit en contact avec les électrodes ( $m^2$ ); « $R_p$ » est la résistance des tranches de l'ail après un nombre d'impulsions donné ( $\Omega$ )



La conductivité relative a été calculée

$$\sigma = \sigma_f / \sigma_i \quad (12)$$

«  $\sigma_f$  » est la conductivité mesurée après un nombre d'impulsions S/cm, «  $\sigma_i$  » est la conductivité mesurée après la première impulsion S/cm (**Patricio, 2003**).

#### 2.4. Détermination de la désintégration cellulaire

**Rogov and Gorbatov (1974)**; a établi une méthode pour déterminer l'influence des champs électriques sur les matériaux alimentaires. Ils ont défini l'indice de désintégration Z pour la description de la désintégration cellulaire. Il a également été appliqué avec succès par **Asavasanti et al., (2010)**; pour quantifier l'effet de différentes intensités de champ électrique sur la rupture cellulaire du tissu de l'oignon. Dans ce modèle, l'indice de désintégration Z est calculé sur la base de la conductivité de l'échantillon intact, complètement désintégré et de l'échantillon traité au CEP mesuré à basse fréquence. Le calcul est indiqué dans l'équation 13:

$$Z = \frac{\sigma - \sigma_i}{\sigma_d - \sigma_i} \quad (13)$$

Les indices «I» et «d» se réfèrent respectivement aux valeurs mesurées des échantillons non traités (intacts) et complètement endommagés. Toutes les valeurs ont été mesurées à la même température, T= 20. L'application des équations ci-dessus donne « Z = 0 » pour les échantillons non traités et « Z= 1 » pour les échantillons complètement endommagés (**Pieter et al., 2012**).

#### 2.5. Microscopie électronique à balayage

Pour étudier l'effet du traitement CEP sur les cellules; les tranche de l'ail ont été séparés en des tranches non traités et traités au CEP. La morphologie et l'organisation des cellules ont été étudiées par microscopie électronique à balayage Hitachi TM-3000 (Tokyo, Japon) fonctionnant à 15 kV et à température ambiante.

Dans chaque expérience, 15 images de trois échantillons différents ont été analysées et des photographies typiques ont été sélectionnées.

#### 2.6. Séchage à microonde assisté à l'air chaud

Le séchage des tranches de l'ail a été effectué par microonde assisté à l'air chaud (figure 23) (système développé par le laboratoire d'ingénierie post-récolte, Département d'ingénierie Bioressource, Université McGill, Canada).

Le générateur de micro-onde fonctionne à 2450 MHz et la puissance peut varier de 0 à 100W. Deux détecteurs à cristal Hewlett Packard (modèle 420A, Californie, États-Unis) surveillent et reflètent la puissance micro-ondes incidente, et un capteur de température à fibre optique (Nortech EMI-TS (Québec, Canada) pour surveiller les températures des échantillons ont été utilisés pour cette expérience.

Un échantillon de 60g a été utilisé dans chaque expérience du séchage, étalé en une seule couche et placé à l'intérieur de la cavité micro-onde. Le séchage a été effectué aux différentes températures 50, 60 et 70°C et une puissance micro-ondes de 100W. Pour éviter la surchauffe des tranches, le conteneur tourne à chaque fois et un ventilateur électrique a été installé au bas du séchoir pour produire un courant d'air. La température des échantillons a été surveillée par le capteur de température à fibre optique et la masse de l'échantillon a été enregistrée par l'ordinateur via un système d'acquisition de données (Hewlett-Packard, USA) (figure 23).

Le séchage a été arrêté lorsque l'échantillon a atteint un poids correspondant à une teneur en humidité d'environ 12%. Après refroidissement, Les tranches d'ail séchées ont été transférées en sachets de polyéthylène sous vide.

## 2.7. Modélisation mathématique du séchage

### 2.7.1. Cinétique de séchage

Le taux d'humidité (MR) des tranches d'ail a été calculé en utilisant l'équation (1):

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_t} \quad (1)$$

Où «  $M_t$  » est la teneur en eau au moment (t), «  $M_0$  » est la teneur en humidité initiale et «  $M_e$  » est la teneur en humidité d'équilibre (le tout en kg d'eau par kg de matière sèche).

Différents modèles ont été testés comme prédicteurs de la cinétique du séchage de l'ail (tableau 11). Une 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 aux équations du modèle sélectionnées. Une analyse statistique a été utilisée pour évaluer l'ajustement des données expérimentales aux modèles en utilisant  $R^2$  (coefficient de détermination), une réduction du chi carré ( $\chi^2$ ) et une erreur quadratique moyenne (RMSE).

Ces paramètres ont été calculés à l'aide des équations ci-dessous:

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{ei} - MR_{pi})^2} \quad (3)$$

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 le modèle.

**Tableau 11:** Modèles mathématiques utilisés pour décrire la courbe de séchage des tranches de l'ail en couche mince.

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

### 2.7.2. Détermination de diffusivité effective

La deuxième loi de Fick a été utilisée pour déterminer le coefficient de diffusivité selon la méthode de Sacilik (2007).

$$\frac{\delta M}{\delta t} = D_{eff} \nabla^2 M \quad (4)$$

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} t\right) \quad (5)$$

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} t \quad (6)$$

Où «  $D_{eff}$  » est la diffusivité effective en ( $m^2/s$ ), « MR » est le taux d'humidité (kg d'eau par kg de matière sèche) au temps  $t$  et «  $L$  » est la demi épaisseur d'échantillon (m).

### 2.8. Détermination de couleur

La couleur d'un produit alimentaire est l'un des facteurs de qualité les plus importants. Le changement de couleur dans les échantillons a été déterminé à l'aide d'un chromomètre (MINOLTA CR-300X, Japon) en termes de  $L^*$  (blancheur/obscurité),  $a^*$  (rougeur/verdure),  $b^*$  (jaunissement/bleuissement) et la différence de couleur ( $\Delta E$ ). La couleur mesurée a été exprimée par la valeur du changement de couleur total ( $\Delta E$ ) selon l'équation (8)

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2} \quad (8)$$

«  $\Delta E$  » indique le degré de changement de couleur global d'un échantillon prétraité par rapport aux valeurs de couleur d'un échantillon non prétraité.

## 2.9. Tests de texture

Pour évaluer la texture des tranches d'ail, des tests de découpe ont été effectués à l'aide d'un analyseur de texture (Instron-4502, États-Unis). Il est équipé d'une force 50N et d'une sonde cylindrique d'un diamètre de 3,4 mm. La sonde était alignée sur le centre d'une tranche d'ail séchée et au trou (diamètre 6 mm) sur la plate-forme. La vitesse de la tête transversale de la sonde a été réglée à 10 mm/min. Le processus de test a été contrôlé et les données ont été collectées à l'aide du logiciel informatique (Instron série IX, version 8.25). La force maximale a été enregistrée et analysée.

## 2.10. Dosage des polyphénols

### 2.10.1. Extraction de polyphénols

La méthode décrite par ISO; 14502-1 est utilisée (ISO, 2005):

- Brièvement,  $0,200 \pm 0,001$ g de chaque échantillon a été pesé dans le tube, et 5ml de méthanol à 70% et à 70°C a été ajouté.
- L'ex-tube a été mélangé et chauffé à 70°C pendant 10 min.
- Après refroidissement à la température ambiante, l'extrait a été centrifugé à 7840 tours pendant 10 min (Centrifugeuse Sigma 4-5L, Allemagne).
- Le surnageant a été décanté dans une conique gradué.
- L'étape d'extraction a été répétée trois fois.
- Les deux extraits ont été rassemblées et le volume ajusté à 10ml avec 70% de méthanol froid.
- Un millilitre de l'extrait a été dilué avec de l'eau jusqu'à 5mL (eau d'ionisée).

### 2.10.2. Détermination des polyphénols totaux

- La teneur en polyphénols totaux (TPC) a été déterminée par spectro-photométrie (Shimadzu, UV 1800, Japan), en utilisant de l'acide gallique comme une norme, selon la méthode décrite par (ISO) 14502-1 (ISO, 2005).
- En bref; 1,0 ml de l'extrait de l'échantillon dilué a été ajouté au tube contenant 5,0 ml d'une dilution 1/10 du réactif de Folin-Ciocalteu dans l'eau.
- Ensuite, 4,0 ml d'une solution auto-bonate de sodium (carbonate de sodium) (7,5%, p/v) ont été ajoutés.
- Les tubes ont ensuite été laissés au repos à température ambiante pendant 60 min avant de l'absorbance à 765 nm a été mesuré par rapport à l'eau.
- Toutes les valeurs sont exprimées en équivalents mg d'acide gallique (GAE) par 100g de matière sèche de l'échantillon de l'ail.
-

## 2.11. Mesure d'activité anti-oxydante

### 2.11.1. Dosage de piégeage des radicaux DPPH

L'activité de piégeage des radicaux libres de l'échantillon de l'ail a été mesurée par l'intermédiaire du 1,1-diphényl-2-picryl-hydrazil (DPPH). Le dosage de piégeage des radicaux est utilisé selon la méthode de Blois (1958) avec quelques modifications.

- En bref, on a préparé une solution de 1 mmol de DPPH dans l'éthanol et 2ml de cette solution a ajouté à 2 ml de l'extrait d'échantillon d'ail aux différentes concentrations dans l'eau distillée.
- Les mélanges ont été agités vigoureusement et ont été ensuite laissé au repos à la température ambiante pendant 30 min.
- Leur absorbance a été mesurée à 517 nm en utilisant un spectrophotomètre (Shimadzu, UV 1800, Japan).
- La solution de DPPH qui ne contient pas un échantillon d'ail a été utilisé comme témoin (Bae *et al.*, 2014).
- Le Trolox a été utilisé pour établir la courbe d'étalonnage et les résultats ont été exprimés en mg de Trolox par g matière sèche de l'échantillon de l'ail.

## 2.12. Analyses statistiques

L'analyse de la variance (ANOVA) a été effectuée en utilisant la procédure des modèles linéaires généraux (GLM) fournie dans la version logicielle 11.0 (2008) de SigmaPlot\SPW11. Les expériences ont été effectuées en triple et les moyennes des trois ensembles de données sont indiquées. Les moyennes étaient séparées par les différences les moins importantes selon les multiples plages de Duncan.

## 3. Résultats et discussion

### 3.1. Effet CEP sur la conductivité électrique

La méthode bien connue d'estimation des dommages de structure cellulaire est basée sur les mesures de conductivité électrique (CE) en fonction de nombre des impulsions aux différentes intensités du champ appliquée est représenté dans la figure 33.

Les traitements par champ électrique pulsé (CEP) ont été effectués en utilisant des intensités de champ électrique E de 500, 1000 et 1500 V/cm ayant des largeurs d'impulsion de 450  $\mu$ s et une fréquence d'impulsion de 10 Hz. Le nombre d'impulsions (n) variait de 10 à 200. La figure 36 montre la fréquence de conductivité typique des échantillons traités au CEP par rapport au nombre d'impulsions et aux échantillons non traités (tissus intacts).

L'électro-perméabilisation de membrane des échantillons induit une augmentation générale des valeurs de conductivité électrique (CE) (Ade-Omowaye *et al.*, 2003).

Les valeurs CE étaient généralement plus faibles à des nombres d'impulsions variant de 10 à 90 par rapport à des nombres d'impulsions variant de 100 à 200. Ainsi, les mêmes observations ont été observées à des intensités de champ électrique plus faibles (500 et 1000 V/cm) qu'à une intensité plus élevée (1500 V/cm). Cela est probablement dû à la membrane cellulaire qui agit comme un isolant électrique.

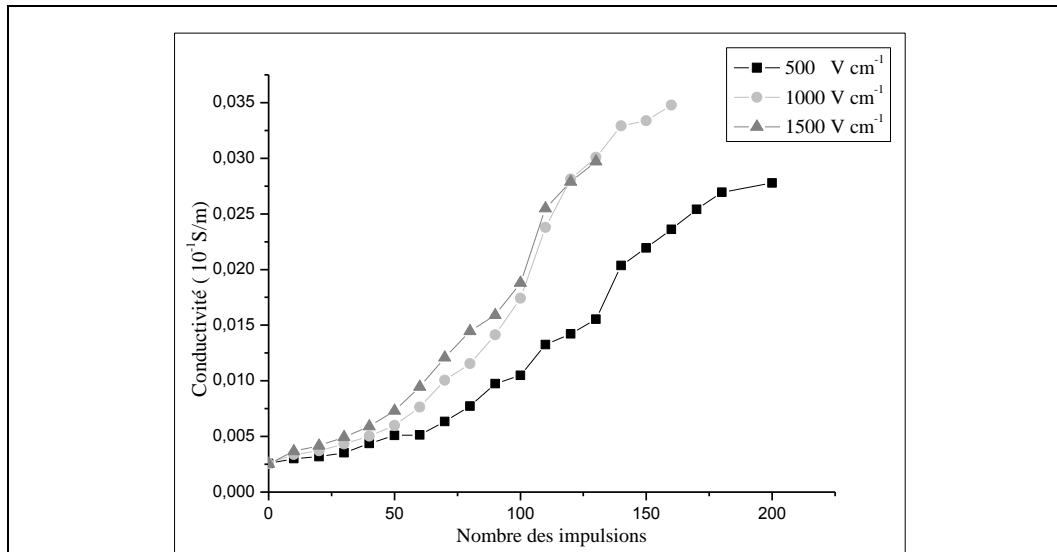
La conductivité des tranches d'ail traitées au CEP a augmenté avec l'augmentation du nombre d'impulsions et de l'intensité du champ électrique. Alors que les valeurs CE des tranches d'ail non traitées sont faibles.

Les changements de la CE pourraient être dus à l'augmentation de la conductivité de la membrane et, par conséquent, à une dégradation irréversible de la membrane et à une perturbation cellulaire subséquente (**Ade-Omowaye et al., 2003**). En augmentant le nombre d'impulsions et l'intensité EF, les valeurs de conductivité augmentent en raison de la diminution de la résistance de la membrane cellulaire lors du flux de courant appliqué pendant la mesure de conductivité (**Bot et al., 2017**).

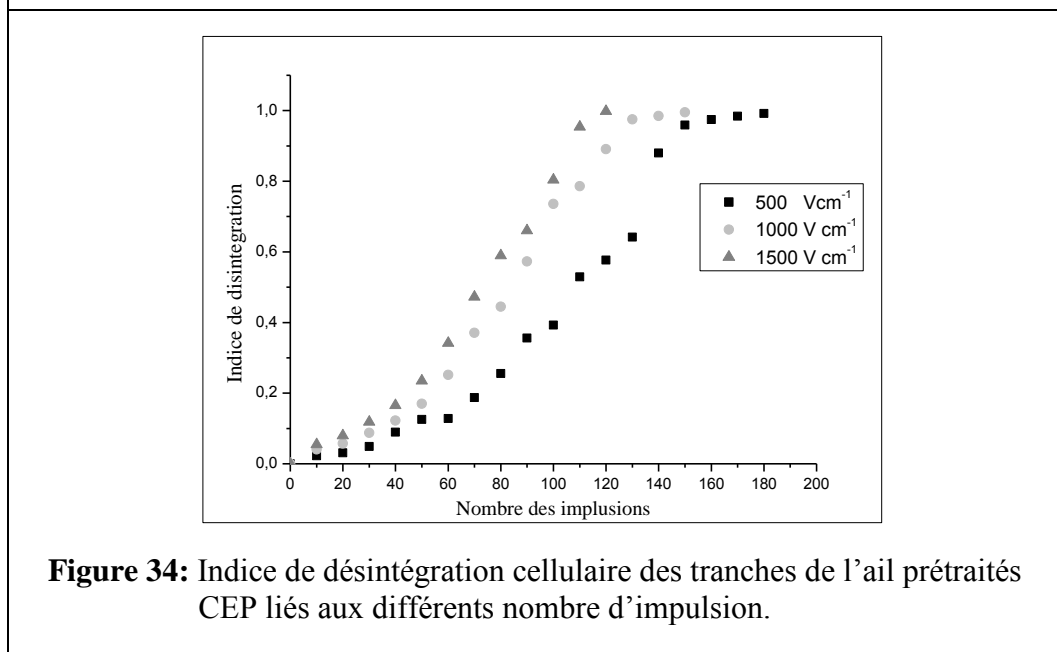
Aux petites valeurs EF, le CEP induit des dommages réversibles à la membrane plasmique. Les processus de rescellement sont évidemment plus prononcés aux plus petites valeurs de champ et sont limités aux valeurs de champ plus élevées, lorsque la plupart des membranes sont endommagées (**Bazhal et al., 2003**).

Par conséquent; **Fincan et Dejmek (2002)**; ont confirmé en montrant que des changements intracellulaires à EF de 0,35 et 0,52 kV/cm entraînent un changement plus progressif dans l'espace extracellulaire. Confirme ainsi le changement dans la région intracellulaire du PEF et que les changements dans la région extracellulaire ont suivi.

À de grandes valeurs EF, des valeurs de conductivité élevées indiquent un changement dans la perméabilité de la membrane (**Bot et al., 2017**). En particulier, le niveau de conductivité plus élevé indique l'électroporation irréversible de la membrane (**Donsi et al., 2010**). Cela a été observé dans les pommes, les carottes et les pommes de terre (**Fincan et Dejmek, 2002; Bazhal et al., 2003; Ersus et Barrett 2010**).



**Figure 33:** Relation entre la conductivité électrique et nombre des impulsions des tranches de l'ail traitées au CEP.



**Figure 34:** Indice de désintégration cellulaire des tranches de l'ail prétraités CEP liés aux différents nombre d'impulsion.

### 3.2. Perméabilité de la membrane cellulaire

L'indice de désintégration ( $Z$ ) est couramment utilisé pour évaluer l'étendue de l'électroporation car il reflète les changements microstructuraux (Bot et al., 2017). Il a été utilisé pour sélectionner les conditions optimales de traitement CEP. L'indice  $Z$  est basé sur les changements de conductivité électrique (CE) des tissus intacts et perméabilisés au CEP. Ainsi, Vorobiev et Lebovka, (2010); ont utilisé cet indice pour divers tissus végétaux.

Les résultats montrent que  $Z$  augmente avec l'augmentation des intensités de champ électrique et du nombre d'impulsions. En effet, en augmentant l'intensité du champ de 500 à 1500V/cm, les valeurs de  $Z$  de manière significative ( $p < 0,05$ ) sont passées respectivement de 0,2 à 0,9. La valeur

maximale est atteinte à  $Z = 1$ . Ces résultats sont survenus à la suite du traitement. Plusieurs études ont rapporté l'efficacité du traitement CEP sur les modifications de la perméabilité cellulaire des tissus végétaux (**Moelants et al., 2014; Bot et al., 2017; Wiktor et al., 2015; Luengo et al., 2014; Janositz et Knorr, 2010**).

La caractéristique du nombre de détérioration électrique est estimée comme un nombre d'impulsions CEP nécessaire pour que  $Z$  atteigne la moitié de sa valeur maximale, c'est-à-dire  $Z = 0,5$ . Le nombre de caractéristiques de dommages électriques peut être assez important dans de petits champs. Afin d'obtenir  $Z = 0,5$ , les intensités de champ électrique appliquées étaient de 500 et 1000 V / cm pour un nombre d'impulsions supérieur à 90. Plusieurs auteurs ont signalé un comportement similaire (**Ade- Omowaye et al., 2003, Ersus et Barrett 2010; El Kantar et al., 2018**).

### 3.3. Microscopie électronique à balayage

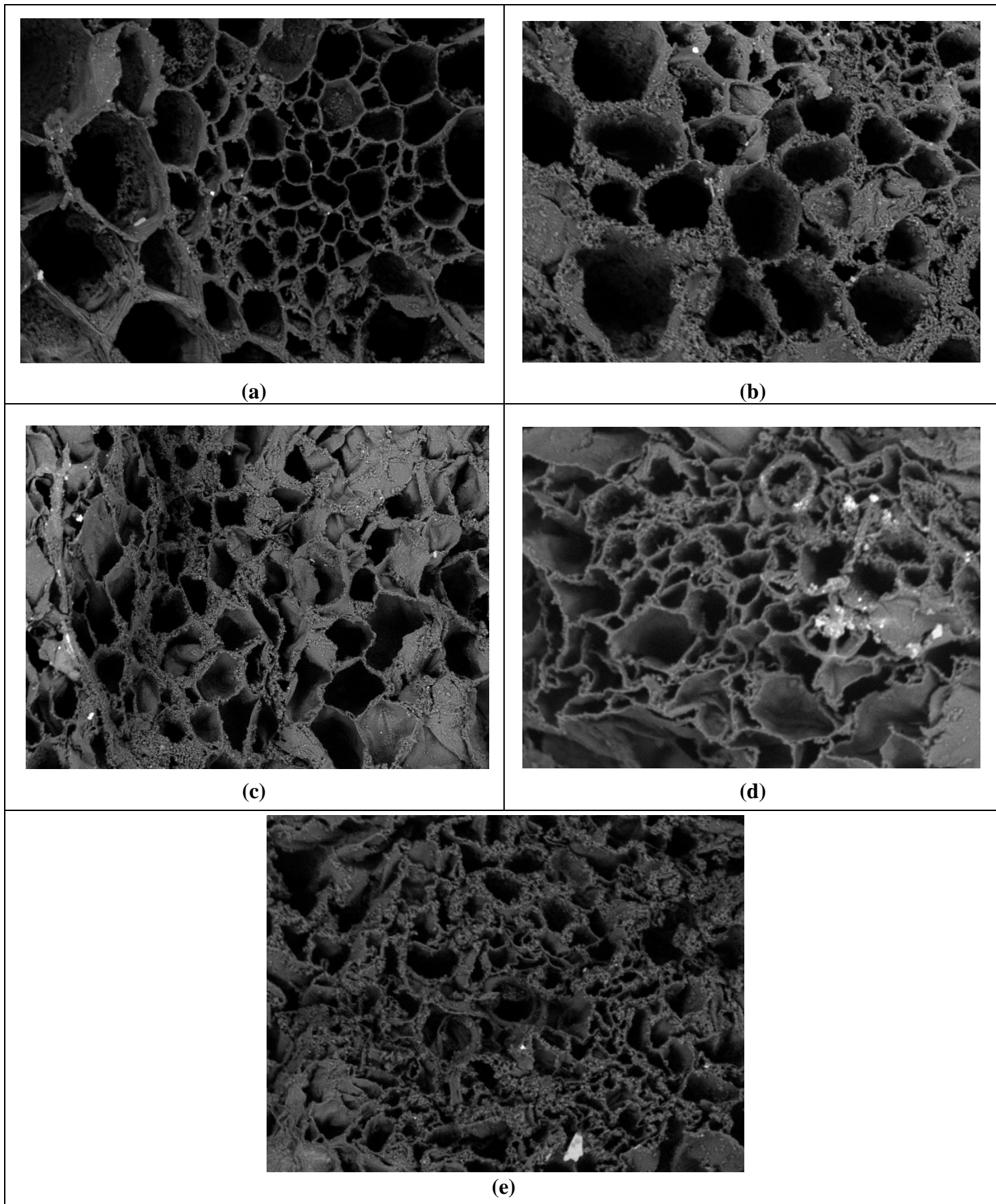
La microscopie électronique à balayage (MEB) a été utilisée pour mieux comprendre l'effet du CEP sur les lyses cellulaires. Les images MEB de tranches d'ail d'échantillons non traités et traités au CEP sont présentées sur la figure 35. Les régions lumineuses de la micrographie sont principalement la membrane cytoplasmique et les parois cellulaires; tandis que les régions plus sombres sont des trous de contenu cellulaire.

Pour les tranches d'ail non traitées, la micrographie montre des cellules isodiamétriques de forme régulière sans dommage ni pores. Après avoir subi un traitement au CEP, les cellules semblaient déchirées et de forme irrégulière, ce qui est dû à la perte de turgescence, ce qui indique une rupture et une fragilité des parois cellulaires. À 1500 V/cm, les tranches étaient déformées de manière significative. **Ben Ammar et al., (2010)**; ont des observations similaires. De plus, la structure de destruction de la membrane due aux intensités de champ électrique produira la formation de pores dans la paroi cellulaire et permettra par conséquent la libération de composants du cytoplasme vers l'extérieur de la cellule (**Fazaeli et al., 2012; Koubaa et al., 2016; El Kantar et al., 2017**).

### 3.4. Taux d'humidité

La micro-onde combinée à l'air chaud est une méthode de déshydratation rapide dans laquelle le taux de séchage semble être influencé principalement par la température. Cependant, les tranches d'ail avec séchage assisté par CEP semblent prometteuses car elles évitent les changements indésirables de pigments, de vitamines et d'agents aromatisants (**Janositz et al., 2011**).

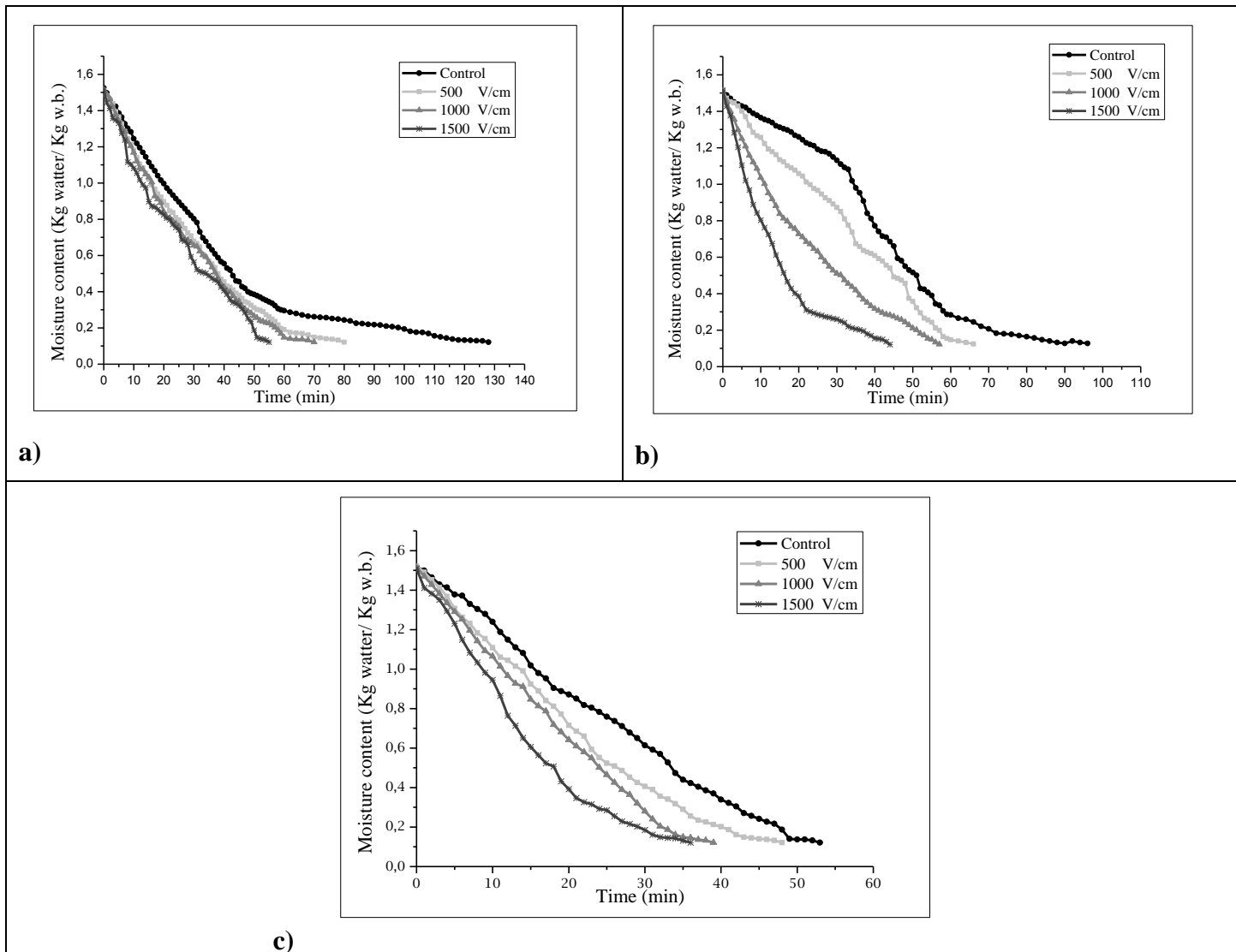




**Figure 35:** Micrographies électroniques à balayage des tranches de l'ail:  
a) non traité, b) traité au CEP (500V/cm), c) traité au CEP (1000V/cm),  
d) traité au CEP (1500V/cm) et e) congelé-décongelé.

Les profils d'humidité du séchage par microondes assisté à l'air chaud sont présentés sur la figure 36. Les expériences ont été réalisées à des températures de 50, 60 et 70°C. Le débit d'air était de 2m/s et la puissance était de 100 W.

Le taux d'humidité (MR) est inversement proportionnel à la température de séchage. Les tranches d'ail diminuent de façon exponentielle avec le temps. L'étape de séchage initiale (étape I) peut être associée à l'évaporation d'eau libre de l'échantillon. Dans cette étape, la température de séchage plus élevée, la durée de l'étape plus courte. L'accélération MR supplémentaire des échantillons traités au CEP est manifestement le reflet des effets d'électroporation (**Liu et al., 2018**). La température à l'intérieur de l'échantillon a commencé à augmenter (stade II) et s'est finalement stabilisée à la température de séchage (stade III). Les étapes II et III correspondent à l'évaporation des différentes formes d'eau (**Adedeji et al., 2008; Hatakeyama et al., 2016; Wong 2017**).



**Figure 36:** Evolution de la teneur en humidité des tranches de l'ail lors du séchage au SMAC aux différentes températures de: a) 50, b) 60 et c) 70°C.

À la même température du séchage, tous les échantillons traités au CEP ont présenté une baisse d'humidité plus élevée que les échantillons non traités. Dans ce cas, les cellules végétales subissent une électroplasmolyse pendant le traitement au CEP, ce qui entraîne une rupture des parois cellulaires et une libération d'humidité rapide ultérieure pendant le séchage, principalement pour les échantillons traités avec une intensité plus élevée.

Il a été observé que des intensités de traitement plus élevées provoquent un degré plus élevé de désintégration cellulaire. En effet, un indice de désintégration cellulaire de  $0,25 \pm 0,064$  est obtenu à 500 V/cm d'intensité de champ. Cependant, cet indice est augmenté à  $0,60 \pm 0,041$  à une intensité de champ électrique plus élevée (1500 V/cm). Par conséquent, une formation de pores ultérieure à l'intérieur de la membrane cellulaire devient plus importante pour la libération d'humidité en dehors de l'espace intercellulaire facilitée par un transfert de masse amélioré (Ostermeier et al., 2018). Les résultats ultérieurs corroborent ceux rapportés par Lebovka et al., (2007); et Janositz et al., (2011); qui ont examiné l'influence du traitement CEP sur le séchage des pommes de terre.

Le temps nécessaire pour sécher les tranches d'ail non traitées au CEP de  $63 \pm 0,2\%$  à  $12 \pm 1\%$  était de 128, 96 et 53 min à des températures de 50, 60 et 70°C, respectivement. Cependant, pour les échantillons prétraités, le temps nécessaire pour obtenir la même teneur en humidité finale ( $12 \pm 1\%$ ) est de 55, 44 et 36 min pour les mêmes températures de séchage. Des observations similaires ont été signalées pour les oignons (Ostermeier et al., 2018) et les poivrons rouges (Ade-Omowaye et al., 2003). Pendant ce temps, le temps de séchage a également été réduit de 57.02, 54.12 et 32.08% lorsque les tranches d'ail ont été traitées avec du CEP par rapport aux échantillons non traités à des températures de 50, 60 et 70°C, respectivement. Cela pourrait être dû aux changements dans le profil de texture des tranches d'ail ainsi qu'à une augmentation de la teneur en eau libre des tranches d'ail.

Par conséquent, plus l'intensité du champ électrique (1500 V/cm) et la température de traitement (70°C) sont élevées, plus le temps de séchage est court. De plus, lorsque le séchage est traité à des températures plus basses ( $\leq 60^\circ\text{C}$ ), les changements indésirables tels que la formation de croûte et / ou la décoloration sont évités (Shynkaryk et al., 2008).

### 3.5. Évaluation des modèles de séchage

Sept modèles répertoriés dans le tableau 11 ont été utilisés pour prédire les changements de teneur en eau des tranches d'ail pendant de séchage. Le tableau 15 montre l'ajustement des sept modèles préférés en termes de coefficient de détermination ( $R^2$ ), de chi carré ( $\chi^2$ ) et d'erreur quadratique moyenne (RMSE). Les sept modèles ont révélé que les valeurs élevées de  $R^2$  variaient entre 0,98 et 1. Par conséquent, tous les modèles testés pouvaient décrire adéquatement le comportement du séchage des tranches d'ail.

**Tableau 15:** Qualité d'adaptation de différents modèles par séchage au SMAC aux différentes températures prétraités au CEP.

Modèle de SMAC	Coefficients	Control	0.5 V/cm	1 V/cm	1.5 V/cm
<b>50°C</b>					
<b>1</b>	R <sup>2</sup>	0,9931	0,9939	0,9925	0,9951
	$\chi^2$	0,0010	0,0009	0,0011	0,0005
	RMSE	0,0033	0,0036	0,0041	0,0033
<b>2</b>	R <sub>2</sub>	0,994	0,9964	0,9949	0,9952
	$\chi^2$	0,0007	0,0005	0,0007	0,0005
	RMSE	0,0028	0,0027	0,0034	0,003
<b>3</b>	R <sub>2</sub>	0,9951	0,9986	0,9988	0,9971
	$\chi^2$	0,0007	0,00021	0,0001	0,0003
	RMSE	0,0028	0,0017	0,0016	0,0026
<b>4</b>	R <sub>2</sub>	0,9951	0,9964	0,9949	0,9952
	$\chi^2$	0,0007	0,0002	0,0001	0,0005
	RMSE	0,0028	0,00178	0,0016	0,0034
<b>5</b>	R <sup>2</sup>	0,9951	0,9986	0,9988	1
	X <sup>2</sup>	0,0009	0,0005	0,0007	0,0006
	RMSE	0,0031	0,0028	0,0034	0,0034
<b>6</b>	R <sub>2</sub>	0,9951	0,9964	0,9949	1
	$\chi^2$	0,0007	0,0005	0,0008	0,0006
	RMSE	0,0028	0,0028	0,0035	0,0035
<b>7</b>	R <sup>2</sup>	0,9929	0,9995	0,9991	0,9965
	X <sup>2</sup>	0,0011	0,0140	0,0088	0,0013
	RMSE	0,0034	0,0140	0,0115	0,0052
<b>60°C</b>					
<b>1</b>	R <sup>2</sup>	0,937	0,9648	0,9985	0,9962
	$\chi^2$	0,0124	0,0052	0,0002	0,0005
	RMSE	0,0125	0,0092	0,0018	0,0034
<b>2</b>	R <sub>2</sub>	0,9556	0,972	0,9985	0,9962
	$\chi^2$	0,0089	0,0043	0,0002	0,0005
	RMSE	0,0106	0,0081	0,0018	0,0034
<b>3</b>	R <sub>2</sub>	0,9769	1	0,9993	0,9981
	$\chi^2$	0,0047	0,0026	0,0001	0,0002
	RMSE	0,0077	0,0064	0,0013	0,0024
<b>4</b>	R <sub>2</sub>	0,9769	0,972	0,9996	0,9981
	$\chi^2$	0,0048	0,0044	6,04856E-05	0,0002
	RMSE	0,0078	0,0083	0,0010	0,0025
<b>5</b>	R <sup>2</sup>	0,9556	0,9985	0,9992	0,9981
	X <sup>2</sup>	0,0091	0,0078	0,00021	0,0005
	RMSE	0,0107	0,0011	0,0019	0,0035
<b>6</b>	R <sub>2</sub>	0,9556	0,972	0,9985	0,9981
	$\chi^2$	0,0094	0,0045	0,0002	0,0005
	RMSE	0,0109	0,0084	0,0019	0,0036

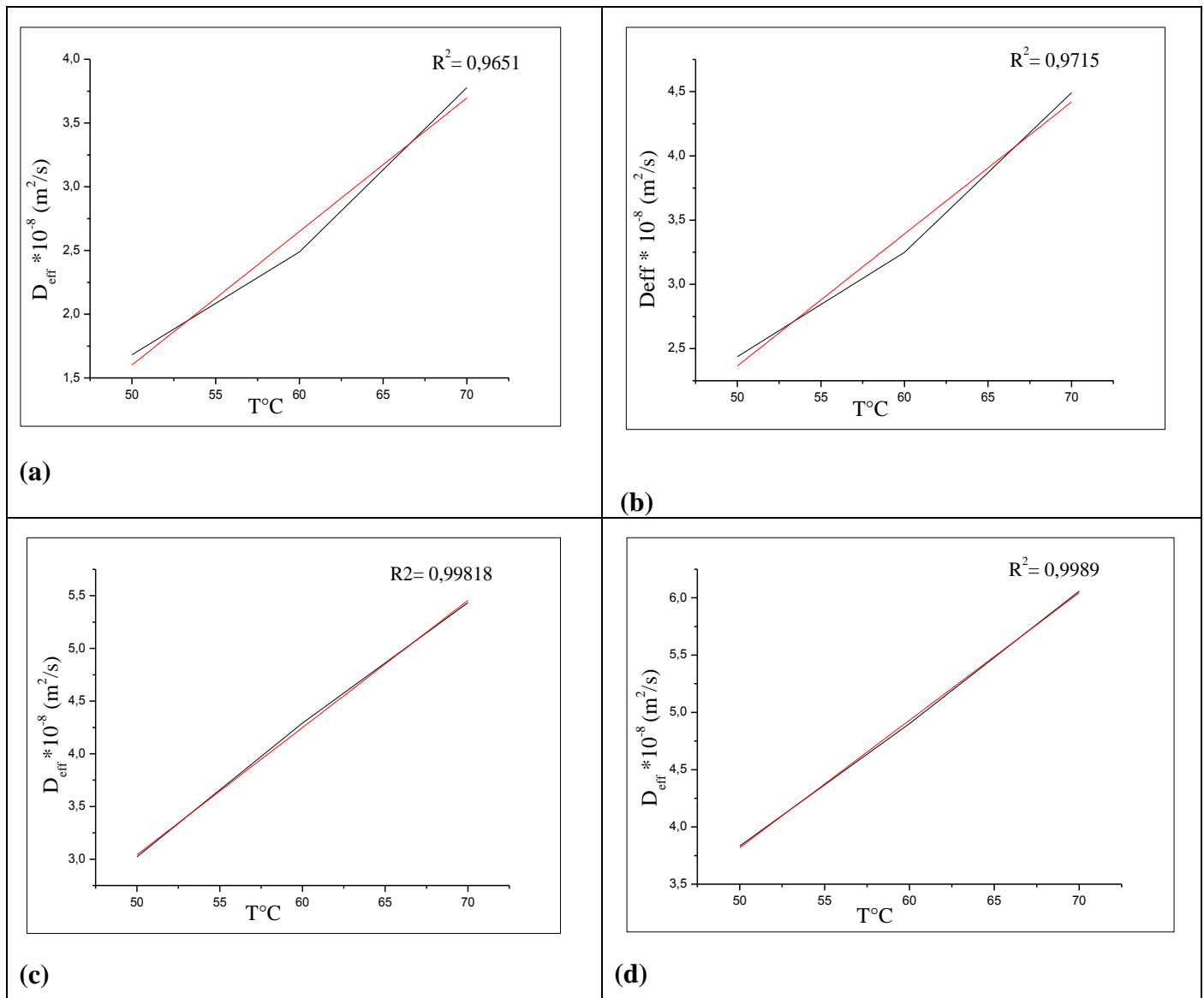
Modèle de SMAC 70°C	Coefficients	Control	0.5 V/cm	1 V/cm	1.5 V/cm
7	R <sup>2</sup>	0,9783	0,9974	0,9979	0,9938
	X <sup>2</sup>	0,0044	0,0004	0,0019	0,0020
	RMSE	0,0075	0,0025	0,0058	0,0067
1	R <sup>2</sup>	0,9755	0,984	0,9773	0,9884
	χ <sup>2</sup>	0,0039	0,0027	0,0038	0,0020
	RMSE	0,0085	0,0074	0,0098	0,0073
2	R <sup>2</sup>	0,9848	0,9902	0,9843	0,9929
	χ <sup>2</sup>	0,0025	0,0017	0,0027	0,0012
	RMSE	0,0068	0,0059	0,0082	0,0058
3	R <sup>2</sup>	0,9987	0,9981	0,9988	0,9963
	χ <sup>2</sup>	0,0002	0,0003	0,0002	0,0006
	RMSE	0,0020	0,0026	0,0023	0,0043
4	R <sup>2</sup>	0,9987	0,9981	0,9988	0,9963
	χ <sup>2</sup>	0,0002	0,0003	0,0002	0,0007
	RMSE	0,0021	0,0026	0,0024	0,0044
5	R <sup>2</sup>	0,9848	0,9902	0,9843	0,9929
	X <sup>2</sup>	0,0026	0,0017	0,0029	0,0013
	RMSE	0,0070	0,0060	0,0085	0,0060
6	R <sup>2</sup>	0,9848	0,9902	0,9843	0,9929
	χ <sup>2</sup>	0,0027	0,0018	0,0030	0,0014
	RMSE	0,0071	0,0061	0,0087	0,0062
7	R <sup>2</sup>	0,9993	0,9989	0,999	0,9982
	X <sup>2</sup>	0,0025	0,0007	0,0011	0,0003
	RMSE	0,0069	0,0038	0,0053	0,0030

Néanmoins, Two-term, Henderson et Pabis et Midilli et al. les modèles ont donné le meilleur ajustement de nos résultats. De plus, les modèles sélectionnés à l'étude ont prédit d'autres processus de séchage de l'ail (Sacilik et Unal, 2005; Fernando et al., 2008; Abano et al., 2011; Fante et Caciano, 2013; Shringi et al., 2014).

### 3.6. Diffusivité efficace

La diffusivité efficace de l'humidité ( $D_{eff}$ ) du matériau alimentaire caractérise sa propriété intrinsèque de transport de masse qui comprend la diffusion moléculaire, la diffusion de liquide, la diffusion de vapeur, l'écoulement hydrodynamique et d'autres mécanismes de transport de masse possibles (Sharma et al., 2009). La figure 37 montre le  $D_{eff}$  pour les tranches d'ail intactes et prétraitées aux différentes températures de séchage.

La diffusivité effective de l'humidité a été calculée en utilisant la deuxième équation de Fick. Les valeurs obtenues variaient respectivement de  $1,68 \times 10^{-8}$  à  $3,78 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s pour les tranches d'ail non traitées et  $2,44 \times 10^{-8}$  à  $6,06 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s pour les tranches d'ail prétraitées. Les valeurs de  $D_{eff}$  ont augmenté avec la diminution de la teneur en humidité des tranches d'ail prétraitées et non prétraitées.



**Figure 37:** Coefficient de diffusivité efficace lors du séchage au SMAC au différentes températures: **a)**  $D_{eff}$  pour contrôle, **b)**  $D_{eff}$  pour prétraité (500 V/cm), **c)**  $D_{eff}$  pour prétraité (1000 V/cm), **d)**  $D_{eff}$  pour prétraité (1500 V / cm).

Les valeurs de  $D_{eff}$  sont considérablement influencées par l'augmentation des températures de et le prétraitement du CEP. En effet, lors de l'augmentation de la température de  $50^{\circ}C$  à  $70^{\circ}C$ , le  $D_{eff}$  variait de  $1,68 \times 10^{-8}$  à  $6,06 \times 10^{-8}$ , respectivement. De plus, il a été remarqué que l'augmentation de la température de traitement induit une augmentation des valeurs de  $D_{eff}$ , et par conséquent, l'activité thermique des molécules d'eau est augmentée, accélérant le transfert de l'eau de l'intérieur vers la surface de la matrice (Bechaa et al., 2019 et Briki et al., 2019).

Concernant le traitement CEP, il a également été observé qu'un  $D_{eff}$  plus élevé pour les tranches prétraitées indique un transfert de masse plus efficace.

En effet, ce comportement a déjà été signalé par Arevalo et al., (2004) et Lebovka et al., (2007); lorsqu'ils ont prétraité des tranches de pomme de terre en utilisant le système CEP.

L'augmentation du transfert de masse a été attribuée aux intensités de champ électrique qui affectent fondamentalement les membranes cellulaires des tissus biologiques, ce qui conduit à l'amélioration du transfert de masse. Dans cette étude, le coefficient  $D_{eff}$  des tranches d'ail a été augmenté de 60% par rapport au témoin.

Cependant, **Arevalo et al., (2004)**; ont montré une augmentation de seulement 40% du coefficient de  $D_{eff}$  des tranches de pomme de terre, probablement en raison du système CEP et des tissus végétaux différents (pommes de terre vs ail). Par conséquent, lorsque l'intensité du champ électrique augmente au-dessus d'une valeur critique, les membranes cellulaires sont irréversiblement endommagées. Par conséquent, la perforation cellulaire des membranes permet une diffusion interne plus élevée (**Ostermeier et al., 2018**).

### 3.7. Énergie d'activation

Les valeurs de l'énergie d'activation ( $E_a$ ) ont été déterminées à partir de la pente de  $\ln D_{eff}$  en fonction  $1/T$ . Pour les tranches d'ail traitées, les valeurs d' $E_a$  ont diminué avec l'augmentation des intensités de champ électrique pulsé.

Les valeurs d' $E_a$  pour toutes les conditions expérimentales variaient de 20,63 à 37,27 kJ/mol pour les tranches d'ail prétraitées et non traitées, respectivement. En général, les valeurs d' $E_a$  obtenues dans cette étude sont cohérentes avec celles rapportées dans la littérature, selon lesquelles  $E_a$  variait de 12,7 kJ/mol à 110 kJ/mol pour divers aliments (**Doymaz, 2011**).

### 3.8. Effet du CEP sur la couleur

Parmi plusieurs attributs de qualité des tranches d'ail séchées, la couleur est importante qui indique le niveau des différents effets de prétraitement pendant le séchage. De plus, la couleur joue un rôle crucial, notamment en ce qui concerne les préférences des consommateurs (**Tilahun et al., 2011**). Le tableau 16 montre le changement de couleur total des différents échantillons pendant le séchage. Les valeurs  $L^*$  des tranches séchées prétraitées et non prétraitées variaient de 51,4 à 65,15. On remarque que la légèreté des tranches d'ail diminue.

Habituellement, pendant le séchage, un assombrissement est observé en raison de l'exposition du matériau à une température élevée et pendant une période plus longue, pendant laquelle l'oxydation se produit (**Perera, 2005; Chen et al., 2020**). Dans notre étude, les données ont clairement montré que les tranches d'ail prétraitées étaient relativement plus foncées que les témoins. Le prétraitement CEP influence les changements structurels dus au phénomène de désintégration de la membrane cellulaire lors du traitement (**Saulis, 2010**). Par conséquent, au cours de ce processus, le contenu intracellulaire (enzymes et ses substrats) peut être libéré à l'extérieur de la cellule, ce qui influence et accélère les changements de couleur.

Concernant les résultats de verdure ( $a^*$ ) et de jaunissement ( $b^*$ ), aucune différence significative n'a été observée entre les échantillons. L'influence des prétraitements n'était distincte que sur la

légèreté des échantillons d'ail. De plus, le changement de couleur total des tranches d'ail exprimé en utilisant la valeur  $\Delta E$  a également augmenté avec l'augmentation des intensités et des températures du CEP. Les échantillons prétraités présentaient des valeurs  $\Delta E$  plus élevées que les échantillons témoins. Des résultats similaires ont été observés pour les abricots et la baie de goji (Dermesonlouoglou *et al.*, 2018; Huang *et al.*, 2019).

**Tableau 16** : Effets du prétraitement au CEP sur la couleur et la dureté des tranches d'ail séché au SMAC.

Temperature	Echantillon	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta E$	Dureté (N)
50°C	Control	65,15± 1.83	0,25± 0.85	19,39± 1.95	3,46 ± 0.91	16.02± 2.09
	500V/cm	62,48± 1.43	0,3± 2.14	20,24± 1.23	2,8± 1.13	17.62± 2.56
	1000V/cm	56,61± 0.94	0,33± 1.91	21,14± 1.46	3,94± 1.53	18.84± 3.83
	1500V/cm	52,56± 2.45	0,38± 1.32	21,25± 2.83	4,95± 1.03	22.34± 4.03
60°C	Control	62,94± 1.35	0,39± 3.12	20,88± 1.83	4,75± 2.91	20.15± 3.13
	500V/cm	59,84± 1.89	0,42 ± 1.03	22,19± 3.15	3,36± 1.59	22.81± 4.83
	1000V/cm	57,67± 1.55	0,4± 2.16	22,93± 1.03	5,65± 2.02	23.86± 2.83
	1500V/cm	58,5± 2.34	0,41± 1.5	21,88± 1.56	4,55± 1.83	26.17± 2.99
70°C	Control	56,15± 3.48	0,4± 2.31	21,67± 1.22	9.40± 2.02	27.66± 3.15
	500V/cm	53,37± 1.22	0,42± 0.81	22,09± 2.6	2,81± 0.83	33.39± 5.03
	1000V/cm	52,08± 1.96	0,45± 2.6	22,24± 1.5	4,11± 1.73	37.67± 1.83
	1500V/cm	51,4± 0.88	0,46± 1.93	21,04± 1.93	4,79± 1.23	40.24± 5.02

### 3.9. Effet du CEP sur les propriétés texturales

La texture des tranches d'ail déshydratées a été déterminée en utilisant un analyseur de texture. La pénétration a été réalisée en utilisant une sonde en contact avec les échantillons. La force a commencé à s'accumuler et l'échantillon a commencé à se déformer en tant que résistance à la force appliquée. Une fois qu'une force suffisante a été appliquée, l'échantillon s'est rompu. Les forces de rupture maximales étaient respectivement de 40,24 et 27,66 N pour les tranches d'ail traitées et non traitées.

Cela montre que les tranches d'ail prétraitées au CEP avaient une texture plus dure que le témoin. Cela pourrait s'expliquer par le degré d'endommagement de la structure cellulaire pendant le prétraitement. Sous l'influence du champ électrique, les membranes cellulaires peuvent avoir été perméabilisées et l'eau a été uniformément répartie dans l'échantillon et a conduit à un séchage uniforme. Cette uniformité de l'eau pourrait également être due au besoin d'énergie plus élevé pour écraser les échantillons prétraités par rapport au contrôle (Singh *et al.*, 2013).

Des observations similaires ont été signalées pour la pomme de terre et les champignons (Dutta *et al.*, 2012; Singh *et al.*, 2013).



### 3.10. Teneur en polyphénols totaux

La teneur totale en phénols des tranches d'ail séchées étudiées variait de 236,14 à 450,18 mg GAE/100g MS pour les différents échantillons (figure 38). Ces résultats sont cohérents avec les résultats fournis par d'autres chercheurs.

Les résultats ont indiqué que l'application du CEP et le temps de séchage ( $p < 0,001$ ) affectaient la teneur en composés phénoliques des tranches d'ail. Les composés phénoliques étaient significativement plus élevés ( $p < 0,05$ ) dans les échantillons traités avec des intensités de 1000 et 1500V/cm. tandis que les échantillons traités avec une faible intensité (500 V/cm) n'étaient pas significativement différents des échantillons non traités. Cela explique, après 500V/cm, que les petits pores transitoires sont probablement plus fréquents que les irréversibles, et n'étaient pas suffisants pour électroporer les vacuoles, où les composés phénoliques sont principalement localisés.

D'autre part, des traitements plus intenses (1000V/cm et 1500 V/cm) provoquent de forts dommages structuraux (moins d'adhérence intercellulaire, pores permanents dans les membranes, libération de contenu intracellulaire), ce qui implique probablement la biosynthèse de composés phénoliques novo-composés pour éviter l'oxydation dommages (**López-Gámez et al., 2020**). **Lohani et Muthukumarappan, (2016)**; ont également signalé des résultats similaires sur la libération de phénols dans les pommes.

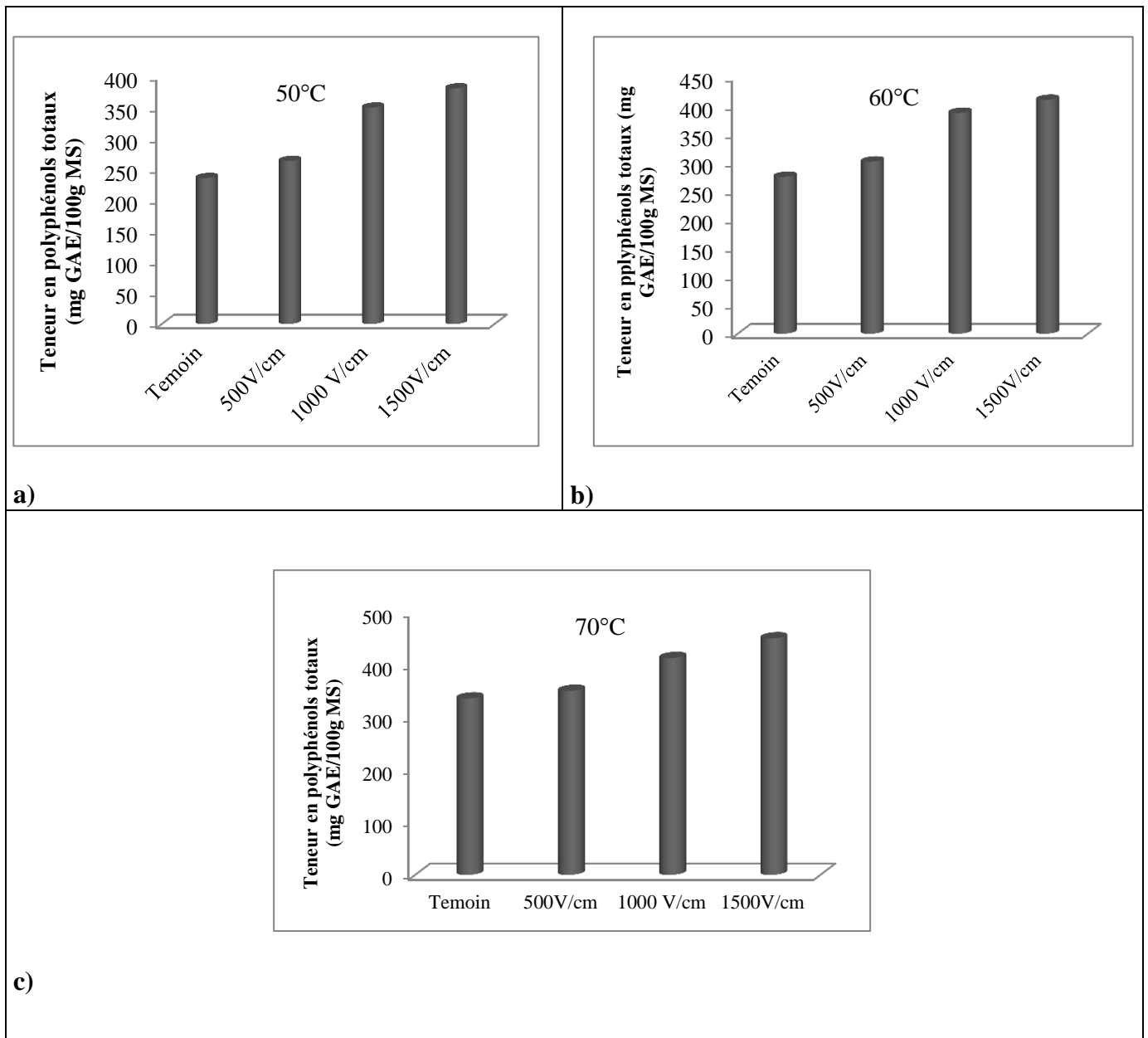
Ainsi, les résultats montrent qu'un séchage initial nettement plus court, a permis d'obtenir une teneur en TPC plus élevée. Selon les résultats, la température plus élevée pourrait détruire la structure de certaines substances phénoliques, mais le temps de séchage a une influence plus intense que la température (**Wang et al., 2018**). Cela s'explique par le fait que le temps de séchage des tranches d'ail prétraitées à haute intensité (ou la teneur en polyphénols est élevé) est très court par rapport aux temps de séchage des tranches traitées à faible intensité ainsi que des tranches non traitées.

### 3.11. Activité antioxydante

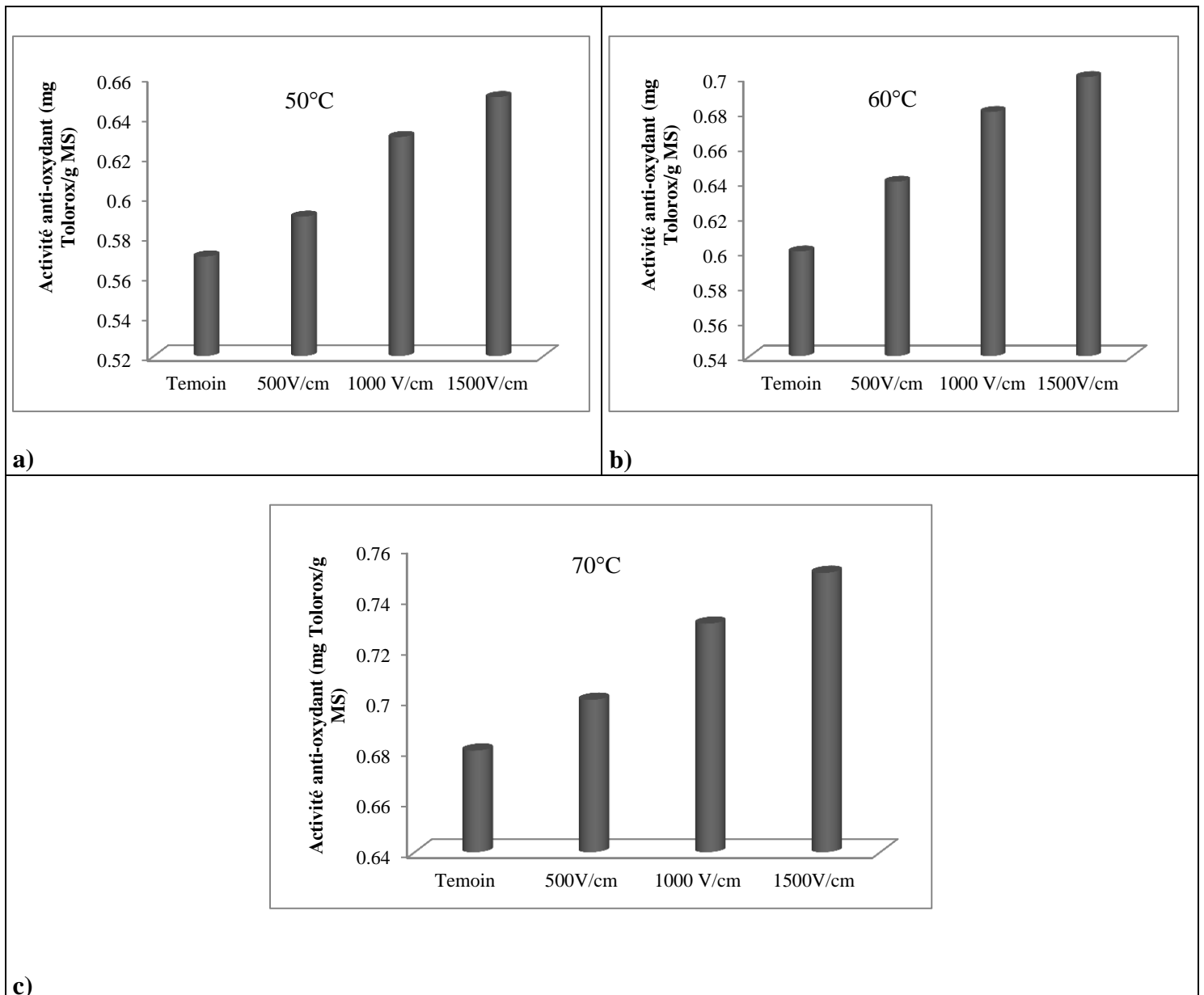
Les variations de l'activité antioxydante des tranches d'ail (traitées et non traitées) après séchage aux micro-ondes assisté à l'air chaud variaient de 0,51 à 0,75 mg de Trolox/g MS (figure 39). L'activité d'élimination des radicaux DPPH était significativement plus élevée ( $p < 0,05$ ) dans les échantillons traités avec des intensités de 1000 et 1500V/cm. Tandis que les échantillons traités avec une faible intensité (500 V/cm) n'étaient pas significativement différents des échantillons non traités. Les résultats obtenus dans la présente étude correspondent aux résultats de **Medina-Meza et al., (2016)**; qui ont montré que le CEP augmentait significativement l'activité antioxydante des extraits de framboise.

Cela peut être dû à l'effet combiné du CEP sur la libération de composés antioxydants. Cependant, la plupart des études précédentes ont rapporté que les traitements CEP conduisent à une activité antioxydante similaire ou inférieure à celle des échantillons témoins (**Sánchez-Moreno et al., 2005**).

Ces différences sont difficiles à expliquer en raison de la complexité des réseaux métaboliques dans les systèmes naturels; plusieurs facteurs peuvent être impliqués dans ces changements, mais cela devra être confirmé dans de futures études.



**Figure 38:** Teneur en polyphénols totaux de l'ail séché au microonde assisté à l'air chaud prétraités au CEP: **a)** 50°C; **b)** 60°C et **c)** 70°C.



**Figure 39:** Activité antioxydant de l'ail séché au micro-onde assisté à l'air chaud prétraités au CEP: **a)** 50°C; **b)** 60°C et **c)** 70°C.

## Conclusion

L'impact d'un prétraitement CEP sur le séchage des tranches de l'ail a été étudié. Il a été montré qu'une augmentation de l'intensité du champ électrique jusqu'à 1500 V/cm entraînait une augmentation de l'indice de désintégration cellulaire jusqu'à  $0 \leq Z \leq 1$ . La désintégration élevée des cellules s'est avérée faciliter la libération d'humidité à la surface du produit.

L'application de CEP a considérablement augmenté le taux de séchage des tranches d'ail, ce qui offre un grand potentiel pour améliorer la qualité des tranches d'ail séchées et la réduction des coûts en termes d'utilisation d'énergie lors du séchage par micro-ondes assisté à l'air chaud des tranches de l'ail traités au CEP. Le champ électrique pulsé a eu un effet sur la réduction du temps de séchage. L'application de CEP a également entraîné le développement de grands pores, ce qui a rendu la structure de l'échantillon plus poreuse.

Deux mandats, Henderson, Pabis et Midilli et *al.* modèle a donné un meilleur ajustement des courbes de séchage des tranches d'ail.

De plus, l'application de CEP avant le séchage a eu un effet positif sur la conservation de la teneur en composés phénoliques totaux et l'activité antioxydant dans les tranches d'ail séchées.

Dans l'ensemble, les résultats de cette étude suggèrent que le prétraitement des tranches d'ail avec du CEP avant le séchage à l'air chaud assisté par micro-ondes a le potentiel de produire des produits avec des caractéristiques acceptables et une meilleure fermeté, répondant à la demande actuelle des consommateurs pour des produits alimentaires sains peu transformés avec des caractéristiques fraîches et une stabilité accrue.

## Effet du champ électrique pulsé (CEP) sur le séchage de l'ail

### III. Etude de l'effet du (CEP) sur le séchage convectif des tranches de l'ail

#### Résumé

Les tranches de l'ail ont été prétraitées avec des champs électriques pulsés (CEP) pour réduire les effets négatifs sur les propriétés physiques-chimiques après séchage convectif. Le prétraitement au CEP a été effectué aux intensités variaient entre 500, 1000 et 1500V/cm puis les tranches sont soumis à un séchage à l'air chaud. Les changements de taux de séchage, les polyphénols totaux, l'activité antioxydant, la texture et la couleur des tranches de l'ail ont été étudiés. Le coefficient de diffusion ( $D_{eff}$ ) a été calculé et une modélisation mathématique a été effectuée.

La combinaison du CEP avec séchage à l'air chaud a entraîné une augmentation du taux de séchage. Le temps de séchage a également été réduit de 23.81% à 55% lorsque les tranches d'ail ont été traitées avec CEP par rapport aux échantillons non traités à des températures de 50, 60 et 70°C.

Dans l'ensemble, les résultats indiquent que la combinaison d'un traitement du CEP avec séchage des tranches de l'ail séchées ont une activité antioxydant et contenu phénolique total élevés.

**Mots clés :** Ail, Champ électrique pulsé, Séchage convectif, Indice de désintégration.

#### 1. Introduction

L'ail (*Allium sativum* L.) est une épice végétale vivace et utilisé comme aromatisant, épice et remède à base de plantes en raison de son odeur âcre (Tao et al., 2018). En raison de leur grande demande pour diverses applications, les tranches d'ail séchées et la poudre sont devenues les produits commerciaux à base d'ail les plus populaires.

L'ail séché peut remplacer l'ail frais dans diverses préparations des produits alimentaires à base de viande, les soupes instantanées, les vinaigrettes ou les cornichons (Demiray et Tulek, 2014; Feng et al., 2019).

Cependant, en raison du temps et de la consommation d'énergie du séchage, la compréhension et l'amélioration des processus conventionnels ont une grande importance dans le secteur alimentaire (Araya-Fariasand et Ratti, 2009; Barba et al., 2015; Huang et al., 2019).

Pour obtenir des produits séchés de haute qualité, divers auteurs ont recommandé le prétraitement des fruits et légumes à champs électriques pulsés (CEP) pour affecter les aspects économiques et les paramètres de qualité des différents processus de séchage (Fauster et al., 2019).

Le traitement CEP dépend du traitement électrique d'impulsions de courte durée (de nanosecondes à millisecondes) avec une intensité de champ électrique allant de 1 à 10 kV/cm. Le prétraitement au CEP conduit à la rupture des membranes cellulaires de matériaux biologiques. Ce phénomène est connu sous le nom d'électro-perméabilisation. Cela entraîne des fuites d'eau et un tissu plus doux qui est beaucoup plus facile à traiter (Ostermeier et al., 2018; Lammerskitten et al., 2019). Cette perméabilisation de la membrane cellulaire entraîne une réduction du temps de séchage grâce à l'accélération du transport de l'eau à partir du tissu biologique (Wu et Zhang, 2014).

L'amélioration du séchage des aliments par le prétraitement du CEP a été étudiée dans de nombreuses publications scientifiques. Les carottes prétraitées en CEP ( $E = 1-1,5$  Kv/cm;  $n = 20$

impulsions) soumises à un séchage à l'air chaud ont montré une vitesse de séchage accrue et une qualité de produit final améliorée par rapport au non traité (Gachovska et al., 2009). Des constatations similaires ont été formulées par Lமானauskas et al., (2015); qui a signalé une réduction du temps de séchage des kiwis ( $T = 50^{\circ}\text{C}$ ) par l'application de CEP ( $E = 5 \text{ kV/cm}$ ) sans affecter la couleur et la teneur en acide ascorbique du produit.

Janositz et al., (2011); ont étudié le séchage des tranches de pomme de terre et détecté une libération accrue de liquide cellulaire pendant le séchage à l'air chaud pour les échantillons prétraités par CEP. Une autre étude montre que le séchage convectif des poivrons rouges pourrait également être accéléré par un prétraitement CEP (Won et al., 2015). En général, l'efficacité de séchage s'est avérée s'améliorer dans la plage de 40 à 70% par le CEP (Fauster et al., 2019).

Cependant, aucune étude ne peut être trouvée concernant le séchage et les propriétés physicochimiques détaillées des tranches de l'ail prétraités avec CEP.

L'objectif du présent travail était d'étudier les effets du prétraitement CEP aux différentes intensités sur le processus de séchage par convection des tranches de l'ail aux différentes températures, ainsi les caractéristiques de qualité des tranches de l'ail (les polyphénol totaux, l'activité antioxydant, la texture et la couleur). Ces facteurs ont été choisis en raison de leur importance dans le maintien d'une couleur et d'une nutrition souhaitables pour l'ail séché.

## 2. Matériels et méthodes

### 2.1. Matière végétale

L'ail (*Allium sativum* L., El-Hamra) a été récolté à Harrouche, un village de Skikda, province, à l'est de l'Algérie. Les bulbes d'ail ont été stockés dans un endroit sec à température ambiante ( $20^{\circ}\text{C}$ ) jusqu'à l'utilisation. Les bulbes ont été séparés en gousses, pelés puis tranchés en morceaux uniformes de 2 mm d'épaisseur. La teneur en humidité des échantillons a été déterminée par séchage dans une étuve à vide (Binder DV53, Francfort, Allemagne) à  $70^{\circ}\text{C}$  pendant 24h selon la méthode de l'Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 2010). La teneur en humidité initiale des échantillons d'ail était de  $63 \pm 0,5\%$  (w/b).

### 2.2. Champs électriques pulsés (CEP)

Le traitement par champ électrique pulsé (CEP) a été effectué dans un système CEP discontinu (Département Technologie Alimentaire, laboratoire technologie alimentaire, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie). L'équipement a été appliqué à l'aide d'un générateur CEP qui produisait des impulsions de forme d'onde à décroissance exponentielle. Le prétraitement a été réalisé dans une chambre de traitement avec deux disques parallèles à électrodes inoxydables.

Les échantillons ont ensuite été prétraités à différentes intensités CEP (500 V/cm, 1000V/cm et 1500V/cm). Les impulsions ont été contrôlées en ligne à l'aide d'un oscilloscope. La durée  $t_i$  des impulsions exponentielles était d'environ  $450\mu\text{s}$  et la fréquence était de 10 Hz pour toutes les

expériences (Figure 30). La température d'entrée de la chambre de traitement CEP était d'environ 20°C et l'augmentation de la température de sortie due au traitement CEP ne dépassait pas 3°C.

### 2.3. Séchage convectif

L'expérience de séchage par convection a été réalisée dans une étuve de séchage conventionnelle (modèle MEMMERT UF750, Allemagne) à 50, 60 et 70°C et un débit d'air de 2 m/s. La perte de poids de l'échantillon pendant le séchage a été mesurée à des intervalles de 10 minutes. Le processus de séchage a été arrêté lorsque la teneur en humidité était d'environ  $12 \pm 0,2\%$ . Les tranches d'ail séchées ont ensuite été transférées en sachets de polyéthylène sous vide après refroidissement.

## 2.4. Modélisation mathématique du séchage

### 2.4.1. Cinétique de séchage

Le taux d'humidité (MR) des tranches d'ail a été calculé en utilisant l'équation (1):

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_t} \quad (1)$$

Où «  $M_t$  » est la teneur en eau au moment (t), «  $M_0$  » est la teneur en humidité initiale et «  $M_e$  » est la teneur en humidité d'équilibre (le tout en kg d'eau par kg de matière sèche).

Différents modèles ont été testés comme prédicteurs de la cinétique de séchage de l'ail (tableau 11). Une 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 aux équations du modèle sélectionnées. Une analyse statistique a été utilisée pour évaluer l'ajustement des données expérimentales aux modèles en utilisant  $R^2$  (coefficient de détermination), une réduction du chi carré ( $\chi^2$ ) et une erreur quadratique moyenne (RMSE). Ces paramètres ont été calculés à l'aide des équations ci-dessous:

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{ei} - MR_{pi})^2} \quad (3)$$

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 le modèle.

### 2.4.2. Détermination de la diffusivité effective

La deuxième loi de Fick a été utilisée pour déterminer le coefficient de diffusivité selon la méthode de **Sacilik (2007)**.

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} t\right) \quad (5)$$

$$(6)$$

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

Où «  $D_{eff}$  » est la diffusivité effective en  $m^2/s$ , « MR » est le taux d'humidité (kg d'eau par kg de matière sèche) au temps « t » et « L » est l'épaisseur d'échantillon (m).

**Tableau 11:** Modèles mathématiques utilisés pour décrire la courbe du séchage des tranches de l'ail en couche mince.

No.	Nom de modèle	Equation	Référence
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$	Bruce (1985)
2	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Hashim et al. (2014)
3	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	Togrul and Pehlivan (2002)
4	Two-term	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(k_1t)$	Sacilik (2007)
5	Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Midilli et al. (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 and Singh (1978)

#### 2.4.5. Énergie d'activation

La dépendance de la diffusivité à la température d'humidité effective est décrite par l'équation d'Arrhenius (équation 8)

$$D_{eff} = D_0 e^{\frac{E_a}{R(T+273.15)}} \quad (7)$$

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 (°C) est la température de traitement.

#### 2.5. Détermination de couleur

La couleur d'un produit alimentaire est l'un des facteurs de qualité les plus importants. Le changement de couleur dans les échantillons a été déterminé à l'aide d'un chromomètre (MINOLTA CR-300X, Japon) en termes de  $L^*$  (blancheur/obscurité),  $a^*$  (rougeur/verdure),  $b^*$  (jaunissement/bleuissement) et différence de couleur ( $\Delta E$ ). La couleur mesurée a été exprimée par la valeur du changement de couleur total ( $\Delta E$ ) selon l'équation (8):

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2} \quad (8)$$

«  $\Delta E$  » indique le degré de changement de couleur global d'un échantillon prétraité par rapport aux valeurs de couleur d'un échantillon non prétraité.



## 2.6. Tests de texture

Pour évaluer la texture des tranches d'ail, des tests de découpe ont été effectués à l'aide d'un analyseur de texture (Instron-4502, États-Unis). Il est équipé d'une force 50N et d'une sonde cylindrique d'un diamètre de 3,4 mm. La sonde était alignée sur le centre d'une tranche d'ail séchée et au trou (diamètre 6 mm) sur la plate-forme. La vitesse de la tête transversale de la sonde a été réglée à 10 mm/min. Le processus de test a été contrôlé et les données ont été collectées à l'aide du logiciel informatique (Instron série IX, version 8.25). La force maximale a été enregistrée et analysée.

## 2.7. Dosage des polyphénols

### 2.7.2. Extraction de polyphénols

La méthode décrite par ISO; 14502-1 est utilisée (ISO, 2005).

- Brièvement,  $0,200 \pm 0,001$ g de chaque échantillon a été pesé dans le tube, et 5ml de méthanol à 70% et à 70°C a été ajouté.
- L'ex-tube a été mélangé et chauffé à 70°C pendant 10 min.
- Après refroidissement à la température ambiante, l'extrait a été centrifugé à 7840 tours pendant 10 min (Sigma 4-5L, Allemagne).
- Le surnageant a été décanté dans une conique gradué.
- L'étape d'extraction a été répétée trois fois.
- Les deux extraits ont été rassemblées et le volume ajusté à 10ml avec 70% de méthanol froid.
- Un millilitre de l'extrait a été dilué avec de l'eau jusqu'à 5mL (eau d'ionisée).

### 2.7.3. Détermination des polyphénols totaux

- La teneur en polyphénols totaux (TPC) a été déterminée par spectro-photométrie (Shimadzu, UV 1800, Japan), en utilisant de l'acide gallique comme une norme, selon la méthode décrite par (ISO) 14502-1 (ISO, 2005).
- En bref; 1,0 ml de l'extrait de l'échantillon dilué a été transféré en double pour séparer des tubes contenant 5,0 ml d'une dilution 1/10 du réactif de Folin-Ciocalteu dans l'eau.
- Ensuite, 4,0 ml d'une solution auto-bonate de sodium (carbonate de sodium) (7,5%, p/v) ont été ajoutés.
- Les tubes ont ensuite été laissés au repos à température ambiante pendant 60 min avant de l'absorbance à 765 nm a été mesuré par rapport à l'eau.
- Toutes les valeurs sont exprimées en équivalents mg d'acide gallique (GAE) par 100g de matière sèche de l'échantillon de l'ail.

## 2.8. Mesure d'activité antioxydante

### 2.8.2. Dosage de piégeage des radicaux DPPH

L'activité de piégeage des radicaux libres de l'échantillon de l'ail a été mesurée par l'intermédiaire du 1,1-diphényl-2-picryl-hydrazil (DPPH). Le dosage de piégeage des radicaux est utilisé selon la méthode de Blois (1958) avec quelques modifications.

- En bref, on a préparé une solution de 1 mmol de DPPH dans l'éthanol et 2ml de cette solution a ajouté à 2 ml de l'extrait d'échantillon d'ail aux différentes concentrations dans l'eau distillée.
- Les mélanges ont été agités vigoureusement et ont été ensuite laissé au repos à la température ambiante pendant 30 min.
- Leur absorbance a été mesurée à 517 nm en utilisant un spectrophotomètre (Shimadzu, UV 1800, Japan).
- La solution de DPPH qui ne contient pas un échantillon d'ail a été utilisé comme témoin (**Bae et al., 2014**).
- Le Trolox a été utilisé pour établir la courbe d'étalonnage et les résultats ont été exprimés en mg de Trolox par g d'échantillon séché.

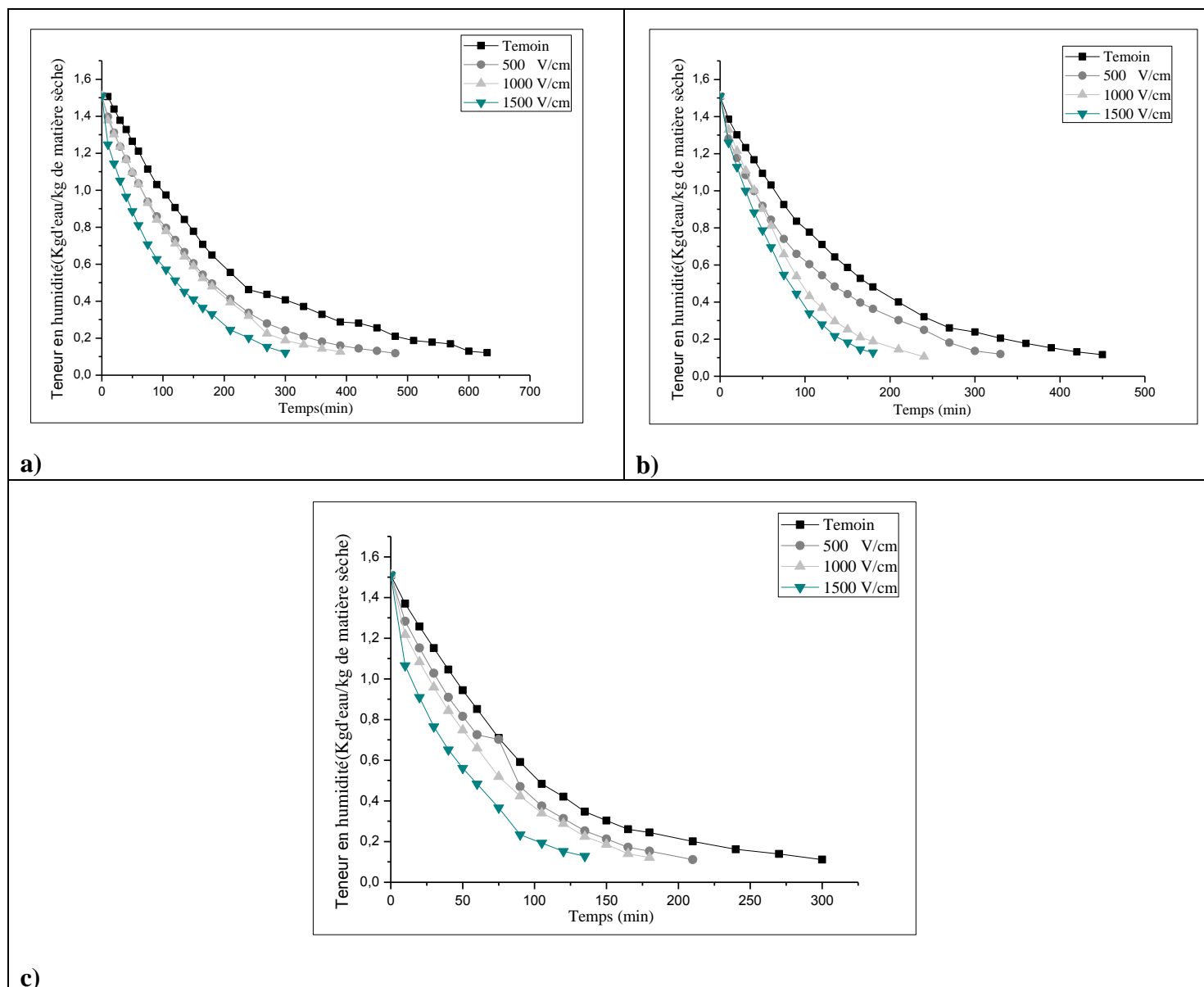
### 2.9. Analyses statistiques

L'analyse de la variance (ANOVA) a été effectuée en utilisant la procédure des modèles linéaires généraux (GLM) fournie dans la version logicielle 11.0 (2008) de SigmaPlot\SPW11. Les expériences ont été effectuées en triple et les moyennes des trois ensembles de données sont indiquées. Les moyennes étaient séparées par les différences les moins importantes selon les multiples plages de Duncan.

## 3. Résultats et discussion

### 3.1. Cinétique du séchage

Le séchage des tissus végétaux dépend de plusieurs facteurs liés à la matière végétale (la composition, les propriétés de surface, la matière végétale et la structure) et aux conditions de séchage (la température et la vitesse de l'air, l'humidité relative et prétraitement avant le séchage) qui peuvent tout affecter le processus de transfert de masse dans le matériel végétal. Le traitement par champ électrique pulsé (CEP) induit la désintégration des membranes cellulaires, améliorer le transfert de masse dans les tissus végétaux traités et exercer un effet positif sur l'efficacité de séchage des tissus végétaux (**Lamanauskas et al., 2015**). L'évolution du rapport d'humidité en fonction du temps lors du séchage des tranches de l'ail non traités, et prétraités au CEP aux températures 50, 60 et 70°C a montré dans la figure 43.



**Figure 43:** Evolution de la teneur en humidité pendant le séchage SC des tranches d'ail non traité et traités par CEP aux différentes températures: **a)** à 50, **b)** à 60 et **c)** à 70°C.

La diminution du taux d'humidité est accentuée avec température de séchage croissante. En outre, tous les échantillons traités au CEP ont présenté une diminution d'humidité plus élevée que les échantillons non traités, séchés à la même température. Ces résultats sont en accord avec les résultats de **Baier et al., (2015)**; qui ont rapporté que le CEP a considérablement amélioré les taux de séchage des pois entiers.

La diminution de l'humidité plus élevée au début du séchage pour les échantillons traités au CEP peut s'expliquer par la présence accrue d'eau de surface après le traitement. Cela est expliqué, que l'effet de CEP avant le séchage peut être associé à l'électroporation survenue ce qui améliore le transfert d'eau des tranches vers l'environnement (**Wiktor et al., 2014**), **Garcia et al., (2007)**; a rapporté que les échantillons de baies de goji étaient caractérisés par un séchage de surface rapide conduisant à des zones de dureté à la surface et à une réduction des taux de séchage.

L'augmentation des intensités de champ électrique pulsé augmente la diminution d'humidité. Cela due que les intensités de traitement les plus élevées entraînent un degré plus élevé de désintégration des cellules. Ainsi, la formation des pores à l'intérieur de la membrane cellulaire augmente avec l'augmentation du niveau de traitement. Par conséquent, la libération d'humidité en dehors de l'espace intercellulaire sera facilitée par un transfert de masse accru (**Ostermeier et al., 2018**).

Le temps de séchage a été considérablement affecté par la température de séchage et le prétraitement. Il convient de souligner que le séchage des tranches de l'ail prétraité au CEP était pratiquement plus rapide que celui des tranches non traités. A savoir, le temps nécessaire pour atteindre l'humidité souhaitée à 70°C était égal à 300, 210, 180 et 135min, pour les tranches de l'ail non traitées et traitées au CEP (à 500, 1000 et 1500V/cm), respectivement.

**Liu et al., (2018)**; ont montré que l'utilisation du CEP peut réduire le temps de séchage sous vide de 22 à 27% par rapport aux tissus intacts. Des résultats similaires ont également été obtenus par **Telfser et Galindo, (2019)**; pour la lyophilisation des feuilles de basilic, le temps de séchage a été réduit de 12 à 9 h. Le temps de séchage des champignons s'est avéré être de 3,91 h pour le groupe témoin, alors qu'après l'application CEP, il a fallu 2,83h (**Çakmak et al., 2016**).

### 3.2. Modélisation mathématique des courbes de séchage

Les modèles mathématiques ont été ajustés aux courbes de séchage des tranches de l'ail et les valeurs statistiques utilisées pour définir la précision du modèle en vue de l'ajustement et de la cinétique de séchage ont été calculées (tableau 17).

Les critères de sélection du meilleur modèle décrivant la cinétique de séchage pour les tranches de l'ail non prétraités et prétraités au CEP étaient conformes aux valeurs moyennes les plus élevées pour  $R^2$ , aux valeurs les plus faibles pour RMSE et de chi carré ( $\chi^2$ ). Le tableau 17 montre que tous modèles appliqués étaient qualifiés pour modéliser la perte d'humidité des tranches d'ail pendant le séchage dans différentes conditions, car toutes les valeurs de  $R^2$ , RMSE et  $\chi^2$  étaient acceptables. Néanmoins, Two-term, Henderson et Pabis, et Midilli et al. correspondent bien aux valeurs aux valeurs RMSE les plus faibles de 0,00044 et 0,0039, et de  $\chi^2 1,386510^{-5}$  à  $8,8033910^{-5}$ , respectivement et valeur moyenne la plus élevée de  $R^2$  (0,998 à 1).

Tableau 17: Qualité d'adaptation des modèles du séchage SC prétraité aux différentes températures.

Model 50°C	Coefficients	Témoin	2KV	3KV	4KV
MR = exp(-k·t)	R <sup>2</sup>	0,9971	0,9998	0,9993	0,9895
	χ <sup>2</sup>	0,00017	4,5354E-05	3,9135E-05	0,0005
	RMSE	0,0013	0,00079	0,0007	0,0032
MR = a exp(-k·t)	R <sup>2</sup>	0,9978	0,9995	0,9993	1
	χ <sup>2</sup>	7,9790E-05	1,4285E-05	3,6282E-05	0,0005
	RMSE	0,0009	0,0004	0,0006	0,0032
MR=a exp(-k·t <sup>n</sup> )+b·t	R <sup>2</sup>	0,9987	0,9998	0,9995	1
	χ <sup>2</sup>	7,8072E-05	1,3865E-05	2,6557E-05	0,0005
	RMSE	0,0009	0,0004	0,0006	0,0032
MR = a exp(-k <sub>0</sub> ·t) + b exp(k <sub>1</sub> ·t)	R <sup>2</sup>	0,9987	0,9998	0,9993	1
	χ <sup>2</sup>	7,8930E-05	1,4071E-05	2,7427E-05	0,0005
	RMSE	0,0009	0,0004	0,0007	0,0033
MR = a exp(-k·t) + c	R <sup>2</sup>	0,9987	0,9998	0,9995	1
	χ <sup>2</sup>	0,00013	3,0622E-05	3,7452E-05	0,0005
	RMSE	0,0012	0,0006	0,00074	0,0033
MR = a exp(-k·t) + b exp(-g·t) + c exp(-h·t)	R <sup>2</sup>	0,9987	0,9998	0,9993	1
	χ <sup>2</sup>	8,0704E-05	1,4504E-05	3,8701E-05	0,0078
	RMSE	0,00092	0,0004	0,0007	0,01240
MR = 1 + a·t + b·t <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	0,9941	0,9969	0,9988	0,9969
	χ <sup>2</sup>	0,00039	0,0002	6,8939E-05	0,0007
	RMSE	0,0020	0,0018	0,00102	0,0037
Model 60°C	Coefficients	Témoin	2KV	3KV	4KV
MR = exp(-k·t)	R <sup>2</sup>	0,9993	0,9621	0,9983	0,9988
	χ <sup>2</sup>	3,4996E-05	0,0009	8,6489E-05	6,6074E-05
	RMSE	0,0006	0,0038	0,0012	0,0012
MR = a exp(-k·t)	R <sup>2</sup>	0,9996	1	1	1
	χ <sup>2</sup>	2,2443E-05	0,0009	8,8033E-05	6,7610E-05
	RMSE	0,0005	0,0038	0,0012	0,0012
MR=a exp(-k·t <sup>n</sup> )+b·t	R <sup>2</sup>	1	1	1	1
	χ <sup>2</sup>	3,59173E-05	0,00094	8,96345E-05	6,9220E-05
	RMSE	0,0006	0,00384	0,0012	0,0012
MR = a exp(-k <sub>0</sub> ·t) + b exp(k <sub>1</sub> ·t)	R <sup>2</sup>	0,9998	0,9993	0,9985	1
	χ <sup>2</sup>	1,3198E-05	0,00096	8,19898E-05	7,0908E-05
	RMSE	0,0004	0,0038	0,0011	0,0012
MR = a exp(-k·t) + c	R <sup>2</sup>	1	1	1	1
	χ <sup>2</sup>	3,6888E-05	0,0009	9,3017E-05	7,2681E-05
	RMSE	0,00068	0,0039	0,0012	0,0012
MR = a exp(-k·t) + b exp(-g·t) + c exp(-h·t)	R <sup>2</sup>	1	1	1	0,9989
	χ <sup>2</sup>	3,7393E-05	0,0010	9,4644E-05	0,0073
	RMSE	0,0006	0,0039	0,0012	0,01276
MR = 1 + a·t + b·t <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	0,997	0,9972	0,9975	0,9982
	χ <sup>2</sup>	0,00018	0,0013	0,0001	0,00013
	RMSE	0,0015	0,0045	0,0014	0,0017
Model 70°C	Coefficients	Témoin	2KV	3KV	4KV
MR = exp(-k·t)	R <sup>2</sup>	0,998	0,9968	0,9976	0,9889
	χ <sup>2</sup>	0,0001	0,0001	0,0001	0,0005
	RMSE	0,0014	0,0018	0,0018	0,0037
MR = a exp(-k·t)	R <sup>2</sup>	1	0,9969	1	0,9932

	$\chi^2$	0,0001	0,00017	0,0001	0,0003
	RMSE	0,0015	0,0018	0,0019	0,0030
<b>MR=a exp(-k·t<sup>n</sup>)+b·t</b>	R <sup>2</sup>	1	1	1	1
	$\chi^2$	0,0001	0,0001	0,0001	0,00056
	RMSE	0,0015	0,0019	0,0019	0,0038
<b>MR = a exp(-k<sub>0</sub> ·t) + b exp(k<sub>1</sub> ·t)</b>	R <sup>2</sup>	1	1	1	1
	$\chi^2$	0,00013	0,00018	0,0001	0,00057
	RMSE	0,0015	0,00194	0,0019	0,0039
<b>MR = a exp(-k·t) + c</b>	R <sup>2</sup>	1	1	1	1
	$\chi^2$	0,00013	0,0001	0,00015	0,0003
	RMSE	0,0015	0,0019	0,00198	0,0031
<b>MR = a exp(-k·t) + b exp(-g·t) + c exp(-h·t)</b>	R <sup>2</sup>	1	1	1	1
	$\chi^2$	0,00013	0,0001	0,00016	0,0006
	RMSE	0,0015	0,00198	0,0020	0,00407
<b>MR = 1 + a·t + b·t<sup>2</sup></b>	R <sup>2</sup>	0,9962	0,9964	0,9958	0,997
	$\chi^2$	0,00038	0,00020	0,00026	0,0007
	RMSE	0,00268	0,00204	0,0025	0,0045

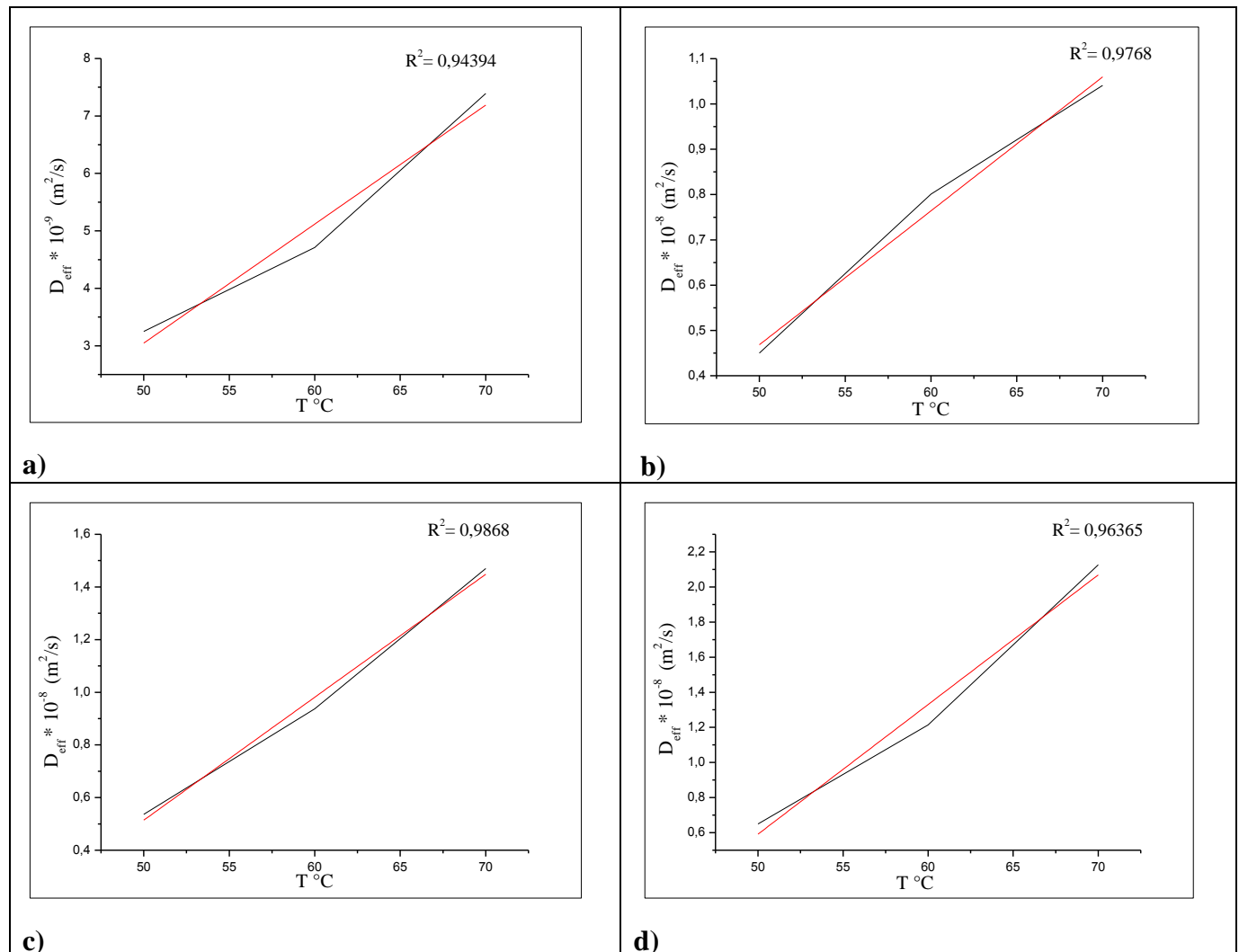
### 3.3. Diffusivité efficace

Le coefficient de diffusion efficace  $D_{eff}$  estimée à partir de l'expérience de séchage de l'humidité pour les tranches non traité et prétraités au CEP à différentes températures a présenté dans figure 44. Le  $D_{eff}$  des échantillons prétraités variait de  $0.49 \times 10^{-8}$  à  $1.47 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s tandis que les échantillons témoins présentaient un ( $D_{eff}$ ) variait de  $3.24 \times 10^{-9}$  à  $7.39 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s. La diffusivité effective de l'humidité calculée situaient dans la plage pour différents produits alimentaires (Zielinska et al., 2013). Le prétraitement par le CEP a entraîné l'augmentation du coefficient de diffusion efficace ( $D_{eff}$ ). Les résultats ultérieurs corroborent ceux rapportés par Amami et al., (2008); et Ostermeier et al., (2018); qui ont prétraité les carottes et les oignons par CEP.

Le coefficient de diffusion augment avec l'augmentation de l'intensité de traitement. Les intensités plus élevée du CEP entraîne une désintégration cellulaire plus élevée. La perforation des membranes cellulaires permet une diffusion interne plus élevée, ce qui conduit à l'augmentation de la libération.

### 3.4. Energie d'activation

L'énergie d'activation ( $E_a$ ) des tranches de l'ail non traités et traités a été calculé par l'équation d'Arrhenius. L' $E_a$  était de 40.56 kJ/mol pour non traités et pour les échantillons traités par CEP était compris entre 25.76 et 30.33 kJ/mol. Les valeurs sont situées dans la plage générale déterminée pour les fruits et légumes. Les variations peuvent être causées par certains facteurs, tels que le prétraitement et la température. Dans le processus de séchage, l'objectif le plus important était d'utiliser une faible quantité d'énergie pour éliminer le plus d'humidité (Wang et al., 2018).



**Figure 44:** Diffusivité effective lors du séchage SC des tranches de l'ail prétraités au CEP:  
**a)** Témoin, **b)** Tranches de l'ail traité à (500 V/cm),  
**c)** Tranches de l'ail traité à (1000V/cm), **d)** Tranches de l'ail traité à (1500V /cm).

### 3.5. Couleur

Les paramètres de couleur  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  ainsi que le changement de couleur total  $\Delta E$  ont été donnés de manière représentative pour tous types d'échantillons, afin de montrer l'effet de prétraitement par CEP sur la couleur des tranches de l'ail séchées à l'air chaud.

L'effet respectif du séchage à l'air chaud à  $70^{\circ}\text{C}$  sur la couleur des tranches de l'ail non traitées et prétraitées a été représenté par une diminution de la légèreté ( $L^*$ ), et une augmentation du jaunissement ( $b^*$ ). **Chen et al., (2020)**; ont indiqué que la couleur des tranches de l'ail a changé pendant le séchage. Ils ont constaté que la légèreté des tranches de l'ail diminue tandis que le jaunissement augmente pendant le séchage en raison de l'augmentation de la température de séchage. **Sharma et Suresh Prasad (2001)**; ont été constaté qu'avec une augmentation de la température de

l'air, la couleur devenait plus foncée, ce qui impliquait un plus grand brunissement des clous de girofle.

En générale, la méthode de séchage a influencé les paramètres de couleur. Habituellement, pendant le séchage, un assombrissement est observé en raison de l'exposition du matériau à une température élevée pendant une longue période, au cours de laquelle l'oxydation se produit (**Perera, 2005**).

Les valeurs  $L^*$  des tranches séchées non prétraité et prétraité variaient de 22,248 à 26,381, tandis que les valeurs  $a^*$  variaient de 3,467 à 5,789 et les valeurs  $b^*$  étaient comprises entre 11,891 et 14,789. Cependant, le changement de couleur était observé pour tous les échantillons prétraités (CEP) par rapport aux échantillons non traités. Le prétraitement influence les changements de structure dus au phénomène de désintégration de la membrane cellulaire lors du traitement CEP (**Saulis, 2010**). Au cours de ce processus, le contenu intracellulaire, par exemple les enzymes et ses substrats, peut être libéré à l'extérieur de la cellule, ce qui influence et accélère les changements de couleur.

Les valeurs plus élevées d'un  $b^*$  des tranches prétraités par CEP a une intensité de 4kv pourraient également être liées à la dégradation de la structure intracellulaire.  $\Delta E$  variait de 3,3 à 6,0, ce qui signifie que les changements entre l'échantillon non traité et l'échantillon traité étaient visibles pour un observateur non formé (**Tiwari et al., 2010**). Comme mentionné ci-dessus, ces changements de couleur étaient probablement liés au phénomène d'électroporation et à ses effets (**Karimi et al., 2016**).

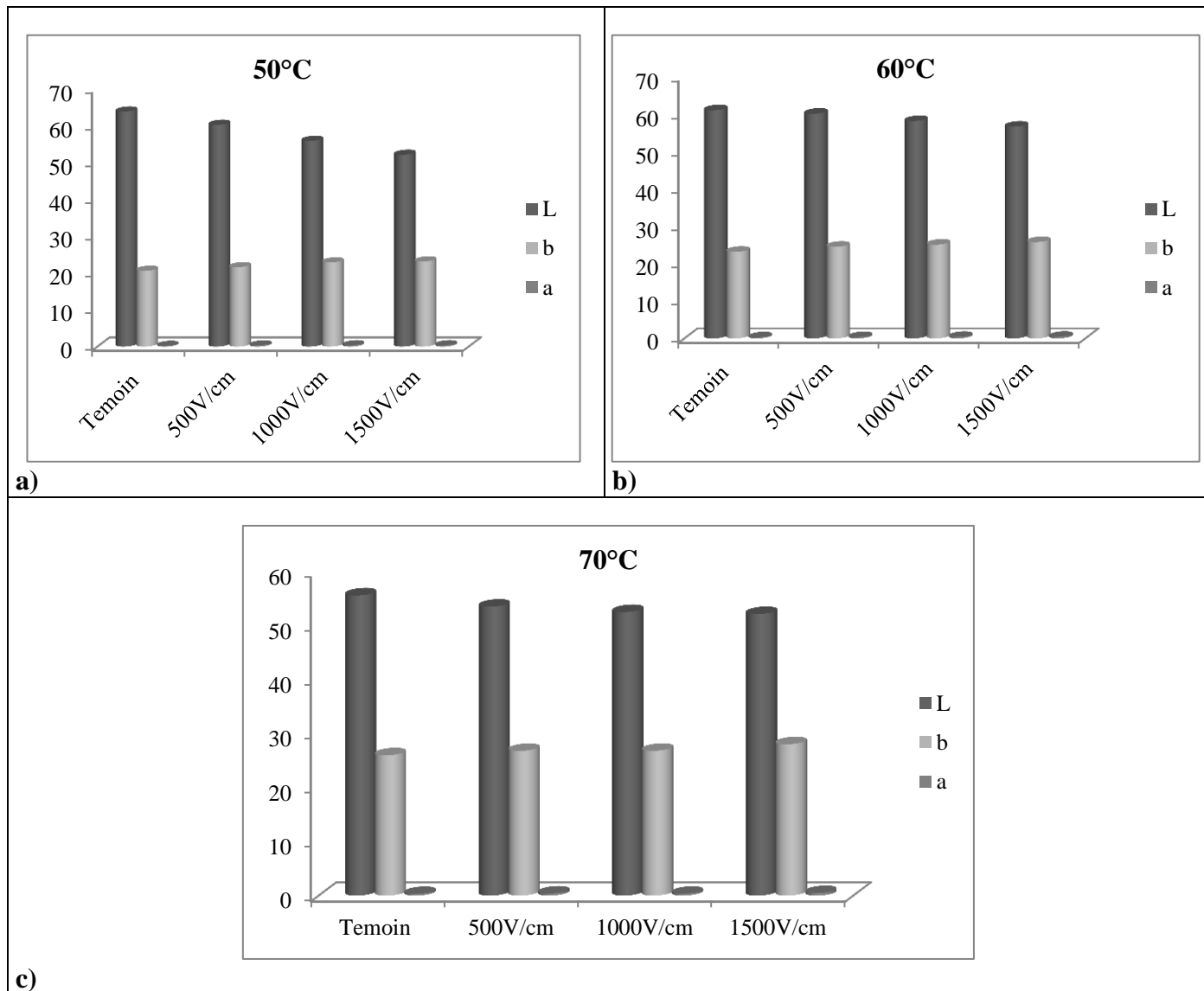
### 3.6. Texture

Les propriétés mécaniques des produits alimentaires séchés sont affectées par la teneur en humidité (**Sagar et Kumar, 2010**). Pour la détermination des propriétés mécaniques des tranches de l'ail séchées, une mesure de texture a été effectuée.

La texture des tranches de l'ail déshydratées a été déterminée en utilisant un analyseur de texture en termes de force de rupture. La sonde de cisaillement de l'analyseur de texture a été utilisée. Les données relatives de la texture des tranches de l'ail déshydratées sont présentées au tableau 18. Le traitement CEP a abouti une texture plus forte par rapport au tissu non traité. L'augmentation de l'intensité du traitement au CEP a significativement influencé la texture des tranches de l'ail.

Cela due, que le traitement au CEP peut améliorer l'effet du ramollissement de la paroi cellulaire lié à la déshydratation.





**Figure 45:** Variation des paramètres de couleur des tranches de l'ail séchés au SC et prétraité par CEP.

Une explication possible des mauvaises caractéristiques de texture des tranches de l'ail séchées traitées au CEP était que le liquide diffusait de l'intérieur vers la surface pendant le processus de séchage et transportait des solutés avec le liquide. Au fur et à mesure que l'humidité de surface s'évaporait, le soluté se concentrait et précipitait, laissant une texture dure et sèche.

L'évaporation de l'eau et l'augmentation de la concentration de solides pendant le séchage lié au CEP ont modifié les propriétés mécaniques des aliments et l'étendue des changements dépendait du mode de séchage.

Généralement, les changements de texture pendant le séchage sont associés au développement de différents processus complexes dans la micro et macro structure, l'évolution du retrait, la densité et la porosité (Ramos *et al.*, 2003).

**Tableau 18:** Dureté des tranches de l'ail séchés par séchage à l'air chaud et prétraité par CEP.

Temperature	Echantillon	Dureté (N)
50°C	Témoin	49.12± 2.09
	500V/cm	49.96± 2.56
	1000V/cm	50.13± 3.83
	1500V/cm	50.20± 4.03
60°C	Témoin	49.71± 3.13
	500V/cm	49.87± 4.83
	1000V/cm	50.21± 2.83
	1500V/cm	50.29± 2.99
70°C	Témoin	50.08± 3.15
	500V/cm	50.20± 5.03
	1000V/cm	50.42± 1.83
	1500V/cm	50.48± 5.02

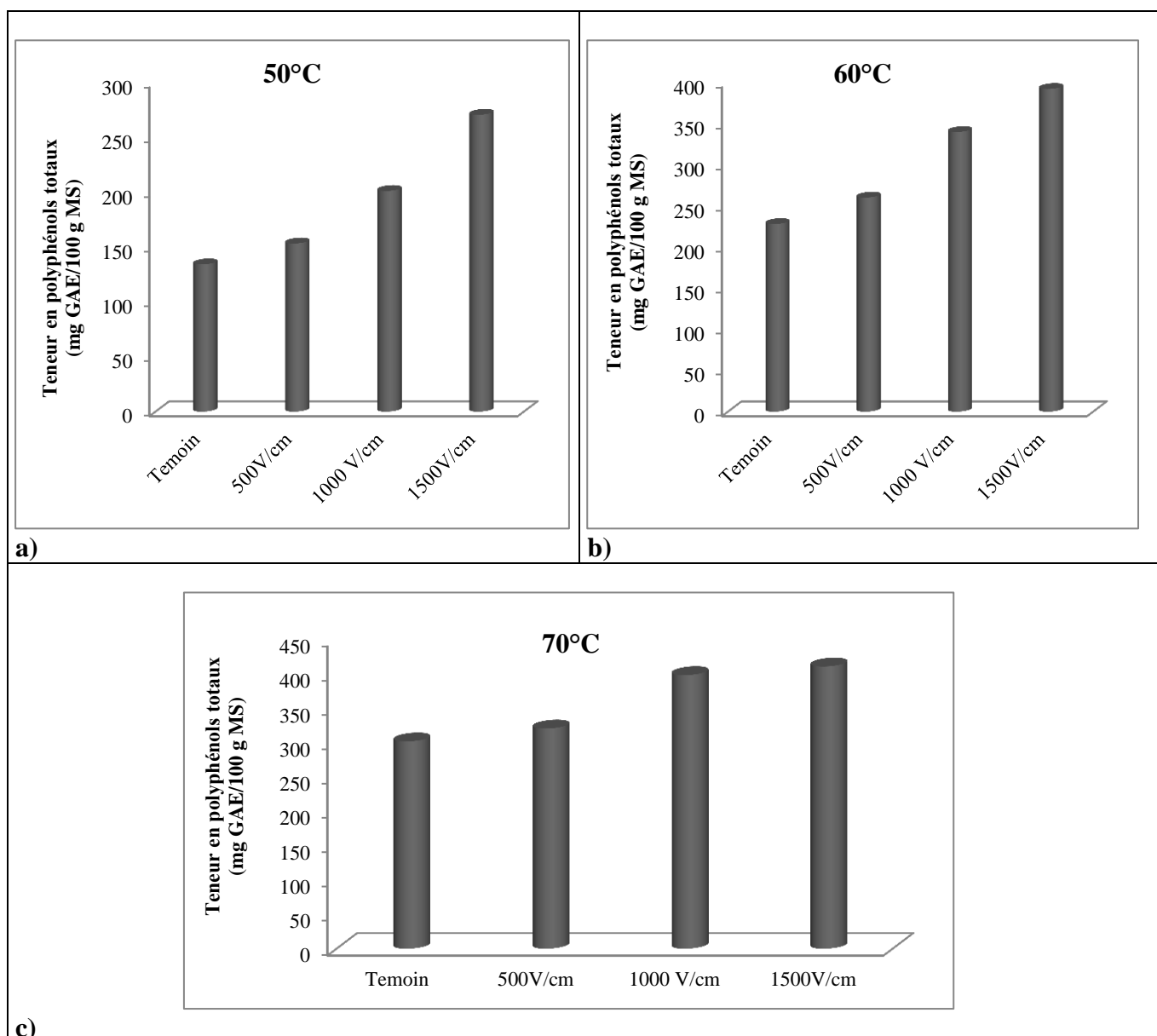
### 3.7. Teneur en polyphénols totaux

Le contenu phénolique total des tranches de l'ail séchées étudiées variait dans une fourchette de 150 à 450 mg GAE/100g MS pour les différents échantillons (figure 46). Ces résultats restent conformes aux données fournies par d'autres chercheurs.

Une concentration plus élevée de TPC indiquée pour les échantillons traités aux 1000 et 1500V/cm par rapport aux échantillons traités à faibles intensités et les échantillons non traités. Ces résultats sont corrélés avec les résultats de **López-Gámez et al., (2020)**; qui ont trouvé que la teneur en polyphénols totaux des carottes traitées par des intensités de 3.5 Kv/cm est très élevée par rapport à celle traitées par des intensités de 0.8kv/cm et des carottes non traitées. Cela peut être dû au type de pores formés et la façon dont les cellules détectent. L'intensité des dommages pourraient provoquer ces changements.

En augmentant l'intensité du champ, le nombre et la taille des pores de la membrane cellulaire augmentent et la structure a été désintégrée de manière optimale, de sorte que la lixiviation des polyphénols au cours du traitement ultérieur a été restreinte (**Bazhal et al., 2003; Janositz et al., 2011**). Ainsi, les enzymes responsables de la détérioration des composés phénoliques ont probablement été partiellement inactivés (**Kim et al., 2013; Li et al., 2015**).

**Vallverdú-Queralt et al., (2013)**; ont rapporté que les changements dans les phénols individuels des tomates traitées au CEP étaient fortement corrélés à des combinaisons spécifiques d'intensité du champ électrique, entraînant des différences dans le contenu total.



**Figure 46:** Teneur en polyphénols totaux de l'ail séchés au SC et prétraités au CEP.

Cependant, le séchage par convection à l'air chaud avec une température de l'air plus élevée et des temps de séchage plus courts a entraîné une teneur plus élevée en composés (Michalska *et al.*, 2016; Piga *et al.*, 2003). Cela est expliqué par les résultats obtenus; dont les échantillons traités aux intensités élevées, le temps de séchage est très court et TPC est élevé.

Pendant le séchage des tranches de l'ail, la formation de constituants capables de réagir avec le réactif Folin a été indiquée et la quantité de ces composés dépendait de la température de séchage.

### 3.8. Capacité d'activité antioxydante

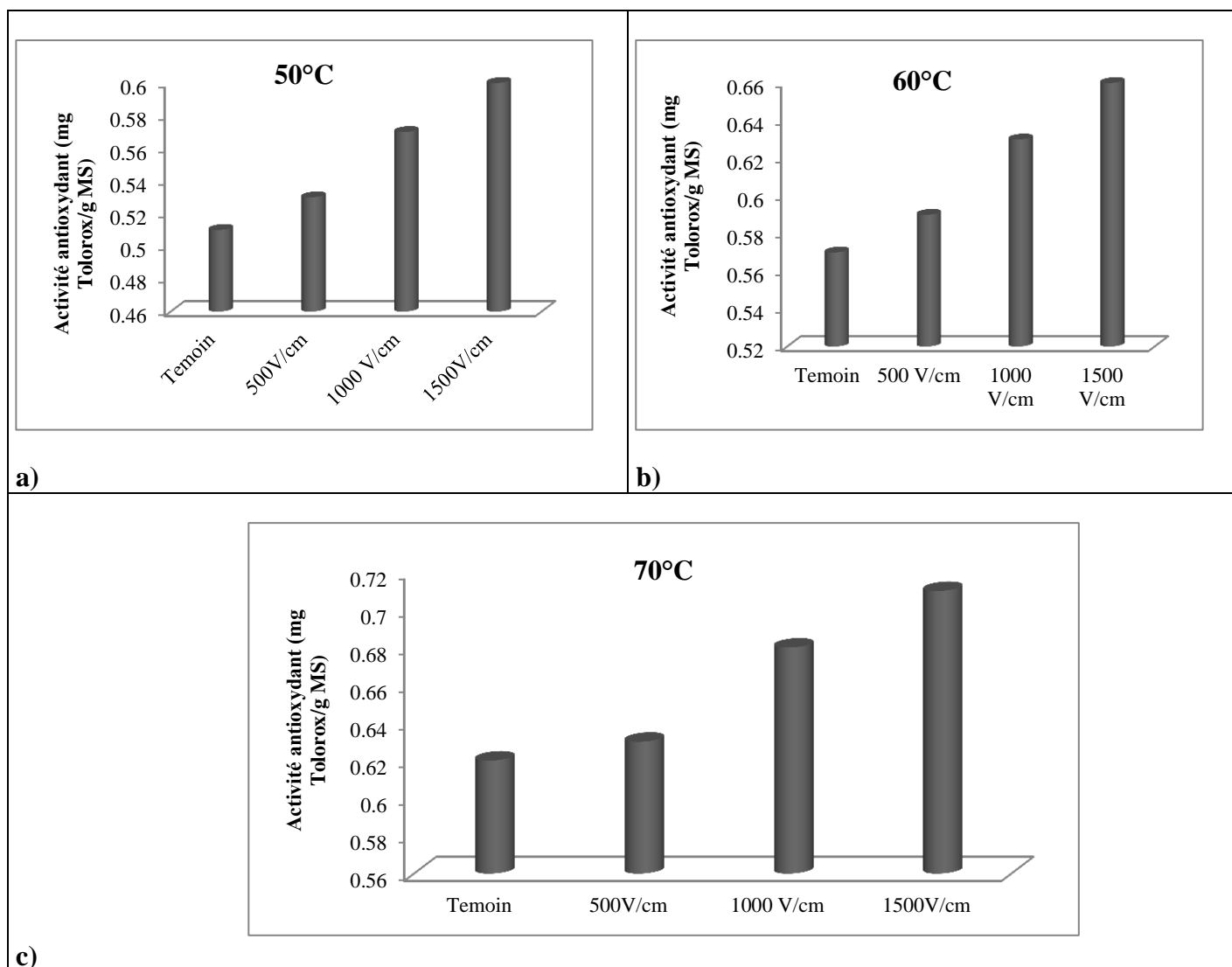
L'effet du traitement CEP et du séchage à l'air chaud des tranches de l'ail sur la capacité antioxydante est illustré à la Figure 47. La capacité antioxydante des tranches de l'ail a été évaluée à l'aide des DPPH.

L'activité antioxydante de tous les échantillons a augmenté après le séchage à l'air chaud, ce qui est en accord avec les études précédentes qui indiquaient que l'activité antioxydante augmente pour les tranches de l'ail séchés à des températures de 60 à 70°C (**Tao et al., 2018**). Ainsi, les chercheurs ont déclaré que l'activité antioxydante la plus faible des échantillons séchés à l'air était liée à une oxydation intensive liée à un long temps de séchage (**Nowacka et al., 2019**).

Les échantillons prétraités aux intensités élevées présentaient les meilleures propriétés d'élimination des radicaux parmi tous les échantillons examinés. Huang et al., (2019); qui ont trouvé que l'activité antioxydante des abricots séchés prétraités par intensité élevée de CEP a augmenté par rapport au non traités. Une telle situation était probablement liée à la meilleure disponibilité et extractibilité des composés chimiques possédant des propriétés antioxydantes en raison de la dégradation de la structure intracellulaire causée le traitement au CEP (1000 et 1500V/cm). Il a été montré précédemment qu'une dégradation plus élevée de la structure cellulaire provoquée par CEP peut améliorer les propriétés antioxydantes des extraits à base de matériel végétal (**Nowacka et al., 2019**).

La capacité antioxydante est élevée pour les échantillons prétraités au CEP par rapport au non traités.

Généralement, le profil antioxydant de l'ail, y compris les phénoliques, subissait des changements dynamiques pendant le traitement thermique et le stockage (**Kim et al., 2013 ; Li et al., 2015**). Il était supposé que certains composés à haute capacité antioxydante pouvaient se former pendant le traitement à l'air chaud, entraînant ainsi une capacité antioxydante légèrement plus élevée des échantillons d'ail séchés (**Tao et al., 2018**).



**Figure 47:** Activité antioxydante de l'ail séchés au SC et prétraités au CEP.

### Conclusion

Pour la première fois, le prétraitement par CEP a été utilisé pour améliorer le processus de séchage et la qualité des tranches d'ail séchées. Les présents résultats indiquent que le transfert de masse amélioré résultant de l'application de CEP favorise le séchage. Les échantillons prétraités présentaient une réduction du temps de séchage plus élevée que les échantillons non traités. De plus, l'évaluation du coefficient de diffusion a révélé que la diffusion efficace de l'humidité pouvait être augmentée de  $3,24 \times 10^{-9}$  à  $1,47 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  dans le tissu prétraité CEP.

Ce travail a prouvé que Two-term, Henderson, Pabis and Midilli et *al.*, sont appropriés pour décrire le séchage convectif des tranches de l'ail à des températures constantes.

Par conséquent, le prétraitement CEP a entraîné une amélioration des caractéristiques de qualité des tranches d'ail séchées prétraités.

Les résultats de cette étude suggèrent que le CEP peut être un prétraitement efficace avec de faibles besoins énergétiques pour améliorer la qualité des produits à base d'ail séché.

# **Partie Expérimentale**

## **Chapitre 5**

## *Effet du prétraitement aux ultrasons sur le séchage convectif et le séchage au microonde assisté à l'air chaud des tranches de l'ail*

### Résumé

La technologie d'ultrasons modifie la structure du produit et favorisent le transfert de masse, lorsqu'elle est utilisée comme prétraitement pour améliorer le séchage des aliments. Dans cette étude, l'effet du traitement par ultrasons sur l'efficacité du séchage et les propriétés physico-chimiques des tranches de l'ail a été étudié. Les tranches d'ail ont été traitées par ultrasons à 40 kHz pendant 10, 20 et 30 min suivies d'un séchage (séchage à l'air chaud et séchage à microonde assistée à l'air chaud) aux différentes températures (50, 60 et 70°C). Différents modèles de cinétique de séchage ont été testés pour la conformité avec les résultats obtenus dans cette étude.

L'application des ultrasons a considérablement accéléré le processus de séchage. Le temps de séchage des tranches d'ail soniqués a été réduit jusqu'à 65% par rapport aux non traités. Les coefficients de diffusion des tranches de l'ail prétraités par ultrason ont augmenté par rapport au non traités.

Les modèles Deux mandats, Henderson et Pabis et Midilli et *al.* ont correspondu les mieux aux données de séchage. Les propriétés physicochimiques des tranches de l'ail prétraités par ultrason, y compris la teneur des polyphénols totaux, l'activité antioxydant, la couleur et la texture étaient principalement meilleures que celles des tranches de l'ail non prétraités.

**Mots clé:** Tranche de l'ail, Ultrason, Séchage SC, Séchage SMAC.

### 1. Introduction

L'ail est largement cultivé et consommé dans le monde entier comme légume important. Il appartient au genre *Allium*. Par contre, la fabrication de produits séchés à base de l'ail pourrait ouvrir des nouvelles perspectives pour sa conservation et sa valorisation (Condurso et *al.*, 2019).

Les méthodes de séchage les plus populaires pour l'ail sont le séchage à l'air chaud et séchage au microonde. Le séchage à l'air chaud implique l'exposition du produit à un flux d'air chaud continu. Il donne des produits déshydratés dont la durée de conservation peut atteindre un an, mais leur qualité est généralement inférieure à celle de produit frais (Ren et *al.*, 2018).

Par contre, le séchage par micro-ondes a attiré beaucoup d'attention en tant que technique appropriée pour améliorer la qualité du produit séché (Jiang et *al.*, 2016). Les avantages du séchage par micro-ondes par rapport au séchage à l'air chaud comprennent un taux de séchage élevé, un retrait réduit, une réhydratation accrue. De plus, moins d'énergie est consommée en raison de son temps de séchage plus court (Jiang et *al.*, 2016).

Cependant, la qualité d'un produit déshydraté dépend également des prétraitements utilisés avant le séchage (Ren et *al.*, 2018). Néanmoins, différentes technologies émergentes sont utilisées pour améliorer le processus de séchage et les propriétés des produits obtenus (Rojas et *al.*, 2020). En fait, plusieurs technologies sont évaluées, telles que les champs électriques pulsés (Lebovka et *al.*, 2007), la technologie haute pression et l'ultrason (de Oliveira et *al.*, 2015).

L'application des ultrasons au séchage des aliments est un traitement relativement nouveau (Szadzińska et *al.*, 2017). Elle est utilisée pour induire des changements chimiques et physiques souhaitables dans les aliments (Ren et *al.*, 2018).

La sonication est une technologie non thermique prometteuse (Tiwari et al., 2009), dans laquelle les ondes sonores à une fréquence de 16 kHz à 100 MHz produisent une compression et des expansions alternatives. Ceci conduit à des modifications de structure de fruits et des légumes (rupture de la paroi cellulaire, création de canaux microscopiques) résultant du stress acoustique «effet éponge». Ces modifications favorisent le transfert d'eau de l'intérieur vers la surface de l'aliment (Szadzińska et al., 2017; Sharma and Dash, 2019; Rojas et al., 2020).

Le traitement par ultrason avant le séchage a également montré des résultats très positifs en termes de réduction du temps de séchage et d'amélioration des propriétés du produit, telles que la couleur, la texture, la rétention et la disponibilité des composés nutritionnels.

Généralement, l'ampleur des effets ultrasoniques est plus grande lorsque le séchage est effectué dans des conditions douces (températures inférieures à 70°C) (García-Pérez et al., 2007) ou à des vitesses d'air inférieures à 2 m/s (Cárcel et al., 2007), qui sont des conditions typiques pour le séchage des fruits et les légumes.

De nombreux chercheurs ont étudié que le prétraitement aux ultrasons dans de nombreux fruits et légumes, comme le melon, les feuilles de mûrier, les algues brunes, les écorces d'orange, etc., est efficace pour raccourcir le temps du séchage et renforcer le processus de séchage par convection (Fernandes and Rodrigues, 2008b; Garcia-Perez et al., 2011; Mothibe et al., 2011; Rodríguez et al., 2014; Kadam et al., 2015; Sledz et al., 2016; Charoux et al., 2017).

L'objectif du présent travail était de décrire l'application d'ultrason comme prétraitement au séchage convectif à l'air chaud et séchage par microonde assisté à l'air chaud des tranches de l'ail, en évaluant:

1. Les changements membranaires par visualisation au microscope électronique à balayage des tissus des tranches d'ail avant et après traitement avec ultrason.
2. L'efficacité du prétraitement ultrasonique sur le séchage des tranches d'ail.
3. La qualité des tranches d'ail séchés prétraités aux ultrasons comparée à celle des tranches séchés non prétraités, y compris le contenu des composés phénoliques, la capacité antioxydant, la couleur et la texture.
4. De plus, la modélisation mathématique est appliquée pour évaluer l'efficacité du séchage par ultrason.

## 2. Matériels et méthodes

### 2.1. Matière végétale

L'ail (*Allium sativum* L., El-Hamra) a été récolté à Harrouche, un village de Skikda, province, à l'est de l'Algérie. Les bulbes d'ail ont été stockés dans un endroit sec à température ambiante (20°C) jusqu'à l'utilisation. Les bulbes ont été séparés en gousses, pelés puis tranchés en morceaux uniformes de 2 mm d'épaisseur. La teneur en humidité des échantillons a été déterminée par séchage



dans une étuve à vide (Binder DV53, Francfort, Allemagne) à 70°C pendant 24h selon la méthode de l'Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 2010). La teneur en humidité initiale des échantillons d'ail était de  $63 \pm 0,5\%$  (w/b).

### **2.2. Prétraitement par ultrason**

Le traitement a été effectué à l'aide d'un bain à ultrasons (Q13/25, Ultronique Brésil; fréquence de 40kHz, puissance volumétrique de 68 W/L contenant d'eau). Des échantillons de 30g des tranches de l'ail ont été immergés dans un bécher en verre contenant d'eau distillé ensuite placé directement dans le bain à ultrasons contenant d'eau. Le prétraitement de sonication a été effectué pendant 10, 20 et 30 min. Le volume d'eau distillé a été choisi pour couvrir les tranches de l'ail et, en même temps, coïncider avec le niveau d'eau utilisée dans le bain d'ultrason pour la transmission des ondes ultrasonores. La température du procédé a été maintenue à 25-30°C par immersion d'eau glacée dans le bain.

Les tranches de l'ail ont été retirées du bécher à la fin de la durée du traitement, et leur humidité de surface a été doucement essuyée par un tampon absorbant.

### **2.3. Microscopie électronique à balayage**

Pour étudier l'effet du traitement par ultrason sur les cellules; les tranches de l'ail ont été séparés en tranches entières non traités et traités aux ultrasons. La morphologie et l'organisation des cellules ont été observées par microscopie électronique à balayage Hitachi TM-3000 (Tokyo, Japon) fonctionnant à température ambiante.

Dans chaque expérience, 15 images de trois échantillons différents ont été analysées et des photographies typiques ont été sélectionnées.

### **2.4. Séchage convectif**

L'expérience de séchage par convection a été réalisée dans une étuve de séchage conventionnelle (modèle MEMMERT UF750, Allemagne). L'expérience a été effectuée aux différentes températures 50, 60 et 70°C et un débit d'air de 2 m/s. La perte de poids de l'échantillon pendant le séchage a été mesuré à des intervalles de 10 minutes. Le processus de séchage a été arrêté lorsque la teneur en humidité était d'environ  $12 \pm 0,2\%$ . Les tranches d'ail séchées ont ensuite été transférées en sachets de polyéthylène sous vide après refroidissement.

### **2.5. Séchage à microonde assisté à l'air chaud**

Le séchage des tranches de l'ail a été effectué par microonde assisté à l'air chaud (figure 19) (système développé par le laboratoire d'ingénierie post-récolte, Département d'ingénierie Bioressource, Université McGill, Canada).

Le générateur de micro-onde fonctionne à 2450 MHz et la puissance peut varier de 0 à 100W. Deux détecteurs à cristal Hewlett Packard (modèle 420A, Californie, États-Unis) surveillent et

reflètent la puissance micro-ondes incidente, et un capteur de température à fibre optique (Nortech EMI-TS (Québec, Canada) pour surveiller les températures des échantillons ont été utilisés pour cette expérience.

Un échantillon de 60g a été utilisé dans chaque expérience de séchage, étalé en une seule couche et placé à l'intérieur de la cavité micro-onde. Le séchage a été effectué aux trois températures 50, 60 et 70°C et une puissance micro-ondes de 100W. Pour éviter la surchauffe des tranches, le conteneur tourne à chaque fois et un ventilateur électrique a été installé au bas du séchoir pour produire un courant d'air. La température des échantillons a été surveillée par le capteur de température à fibre optique et la masse de l'échantillon a été enregistrée par l'ordinateur via un système d'acquisition de données (Hewlett-Packard, USA).

Le séchage a été arrêté lorsque l'échantillon a atteint un poids correspondant à une teneur en humidité d'environ 12%. Après refroidissement, Les tranches d'ail séchées ont été transférées en sachets de polyéthylène sous vide.

## 2.6. Modélisation mathématique du séchage

### 2.6.1. Cinétique de séchage

Le taux d'humidité (MR) des tranches d'ail a été calculé en utilisant l'équation (1):

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_t} \quad (1)$$

Où «  $M_t$  » est la teneur en eau au moment (t), «  $M_0$  » est la teneur en humidité initiale et «  $M_e$  » est la teneur en humidité d'équilibre (le tout en kg d'eau par kg de matière sèche).

Différents modèles ont été testés comme prédicteurs de la cinétique de séchage de l'ail (voir tableau 1). Une 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 aux équations du modèle sélectionnées. Une analyse statistique a été utilisée pour évaluer l'ajustement des données expérimentales aux modèles en utilisant  $R^2$  (coefficient de détermination), une réduction du chi carré ( $\chi^2$ ) et une erreur quadratique moyenne (RMSE). Ces paramètres ont été calculés à l'aide des équations ci-dessous:

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{ei} - MR_{pi})^2} \quad (3)$$

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 le modèle.

**Tableau 11:** Modèles mathématiques utilisés pour décrire la courbe de séchage des tranches de l'ail en couche mince.

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

### 2.6.2. Détermination de la diffusivité effective

La deuxième loi de Fick a été utilisée pour déterminer le coefficient de diffusivité selon la méthode de Sacilik (2007).

$$\frac{\delta M}{\delta t} = D_{eff} \nabla^2 M \quad (4)$$

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} t\right) \quad (5)$$

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} t \quad (6)$$

Où «  $D_{eff}$  » est la diffusivité effective en  $m^2/s$ , « MR » est le taux d'humidité (kg d'eau par kg de matière sèche) au temps « t » et « L » est demi l'épaisseur d'échantillon (m).

### 2.7. Énergie d'activation

La dépendance de la diffusivité à la température d'humidité effective est décrite par l'équation d'Arrhenius (Equation 8):

$$D_{eff} = D_0 e^{\frac{E_a}{R(T+273.15)}} \quad (7)$$

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

### 2.8. Détermination de couleur

La couleur d'un produit alimentaire est l'un des facteurs de qualité les plus importants. Le changement de couleur dans les échantillons a été déterminé à l'aide d'un chromomètre (MINOLTA

CR-300X, Japon) en termes de  $L^*$  (blancheur/obscurité),  $a^*$  (rougeur/verdure),  $b^*$  (jaunissement/bleuissement) et différence de couleur ( $\Delta E$ ). La couleur mesurée a été exprimée par la valeur du changement de couleur total ( $\Delta E$ ) selon l'équation (8)

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2} \quad (8)$$

$\Delta E$  indique le degré de changement de couleur global d'un échantillon prétraité par rapport aux valeurs de couleur d'un échantillon non prétraité.

## 2.9. Test de texture

Pour évaluer la texture des tranches d'ail, des tests de découpe ont été effectués à l'aide d'un analyseur de texture (Instron-4502, États-Unis). Il est équipé d'une force 50N et d'une sonde cylindrique d'un diamètre de 3,4 mm. La sonde était alignée sur le centre d'une tranche d'ail séchée et au trou (diamètre 6 mm) sur la plate-forme. La vitesse de la tête transversale de la sonde a été réglée à 10 mm/min. Le processus de test a été contrôlé et les données ont été collectées à l'aide du logiciel informatique (Instron série IX, version 8.25). La force maximale a été enregistrée et analysée.

## 2.10. Dosage des polyphénols

### 2.10.1. Extraction de polyphénols

La méthode décrite par ISO; 14502-1 est utilisée (ISO, 2005).

- Brièvement,  $0,200 \pm 0,001$ g de chaque échantillon a été pesé dans le tube, et 5ml de méthanol à 70% et à 70°C a été ajouté.
- L'ex-tube a été mélangé et chauffé à 70°C pendant 10 min.
- Après refroidissement à la température ambiante, l'extrait a été centrifugé à 7840 tours pendant 10 min (Sigma 4-5L, Allemagne).
- Le surnageant a été décanté dans une conique gradué.
- L'étape d'extraction a été répétée trois fois.
- Les deux extraits ont été rassemblées et le volume ajusté à 10ml avec 70% de méthanol froid.
- Un millilitre de l'extrait a été dilué avec de l'eau jusqu'à 5mL (eau d'ionisée).

### 2.10.2. Détermination des polyphénols totaux

- La teneur en polyphénols totaux (TPC) a été déterminée par spectro-photométrie (Shimadzu, UV 1800, Japan), en utilisant de l'acide gallique comme une norme, selon la méthode décrite par (ISO) 14502-1 (ISO, 2005).
- En bref; 1,0 ml de l'extrait de l'échantillon dilué a été transféré en double pour séparer des tubes contenant 5,0 ml d'une dilution 1/10 du réactif de Folin-Ciocalteu dans l'eau.

- Ensuite, 4,0 ml d'une solution auto-bonate de sodium (carbonate de sodium) (7,5%, p/v) ont été ajoutés.
- Les tubes ont ensuite été laissés au repos à température ambiante pendant 60 min avant de l'absorbance à 765 nm a été mesuré par rapport à l'eau.
- Toutes les valeurs sont exprimées en équivalents mg d'acide gallique (GAE) par 100g de matière sèche de l'échantillon de l'ail.

## 2.11. Mesure d'activité antioxydante

### 2.11.1. Dosage de piégeage des radicaux DPPH

L'activité de piégeage des radicaux libres de l'échantillon de l'ail a été mesurée par l'intermédiaire du 1,1-diphényl-2-picryl-hydrazil (DPPH). Le dosage de piégeage des radicaux est utilisé selon la méthode de Blois (1958) avec quelques modifications.

- En bref, on a préparé une solution de 1 mmol de DPPH dans l'éthanol et 2ml de cette solution a ajouté à 2 ml de l'extrait d'échantillon d'ail aux différentes concentrations dans l'eau distillée.
- Les mélanges ont été agités vigoureusement et ont été ensuite laissé au repos à la température ambiante pendant 30 min.
- Leur absorbance a été mesurée à 517 nm en utilisant un spectrophotomètre (Shimadzu, UV 1800, Japan).
- La solution de DPPH qui ne contient pas un échantillon d'ail a été utilisé comme témoin (Bae et al., 2014).
- Le Trolox a été utilisé pour établir la courbe d'étalonnage et les résultats ont été exprimés en mg de Trolox par g d'échantillon séché.

### 2.12. Analyses statistiques

L'analyse de la variance (ANOVA) a été effectuée en utilisant la procédure des modèles linéaires généraux (GLM) fournie dans la version logicielle 11.0 (2008) de SigmaPlot\SPW11. Les expériences ont été effectuées en triple et les moyennes des trois ensembles de données sont indiquées. Les moyennes étaient séparées par les différences les moins importantes selon les multiples plages de Duncan.

## 3. Résultats et discussions

### 3.1. Microscopie électronique à balayage (MEB)

L'effet d'ultrason sur la structure des tranches de l'ail a été observé sous microscopie électronique à balayage (MEB).

Les images des tranches de l'ail non prétraités (figure 45) ont révélé que les parois cellulaires sont intactes et qu'aucun espace intracellulaire n'est reconnaissable, il y a moins de structures et de pores

ouverts que les échantillons prétraités. Par contre, la structure des tranches de l'ail prétraités est plus poreuse. **Feng et al., (2019)**; ils ont observés des tranches de l'ail prétraités par ultrason + Alcohol et US+eau, ils ont montré des microstructures rompues avec un grand nombre de trous à la surface. En fait, de nombreuses recherches ont prouvé la perturbation des tissus et des cellules et la formation de micro-canaux en raison de l'effet de la cavitation acoustique, générée par les irradiations ultrasonores (effet éponge) (**Ricce et al., 2016; Tao et al., 2018**).

Les ultrasons peuvent créer de nouveaux espaces intercellulaires entre les cellules et une porosité élevée, entraînant de nombreuses ruptures à la surface. La création de canaux microscopiques à ultrasons a été rapportée. L'eau utilise ces canaux microscopiques pour se déplacer plus facilement et plus rapidement de l'intérieur de l'échantillon à sa surface (**Fernandes et al., 2009; Dehsheikh et al., 2019**).

Nos résultats sont également conformes aux rapports précédents (**de la Fuente-Blanco et al., 2006; Cárcel et al., 2012; Rodríguez et al., 2014**).

Des images MEB de fruits jamun traités par USVOD ont confirmé l'effet de canalisation provoqué par un traitement combiné par ultrasons et sous vide (**Sharma et Dash, 2019**). Le fruit de jamun traité par USVOD a montré la distorsion cellulaire, la rupture des tissus et produit des espaces intercellulaires irréguliers.

Le traitement par ultrasons a généré des ondes acoustiques qui créent des vides de cavitation près de la surface du fruit. Le vide de cavitation a montré des phases de compression et d'expansion, puis s'est effondré.

Ce processus libère les gaz des espaces intercellulaires qui pourraient être responsables de l'effet spongieux et changer le tissu de l'aliment.

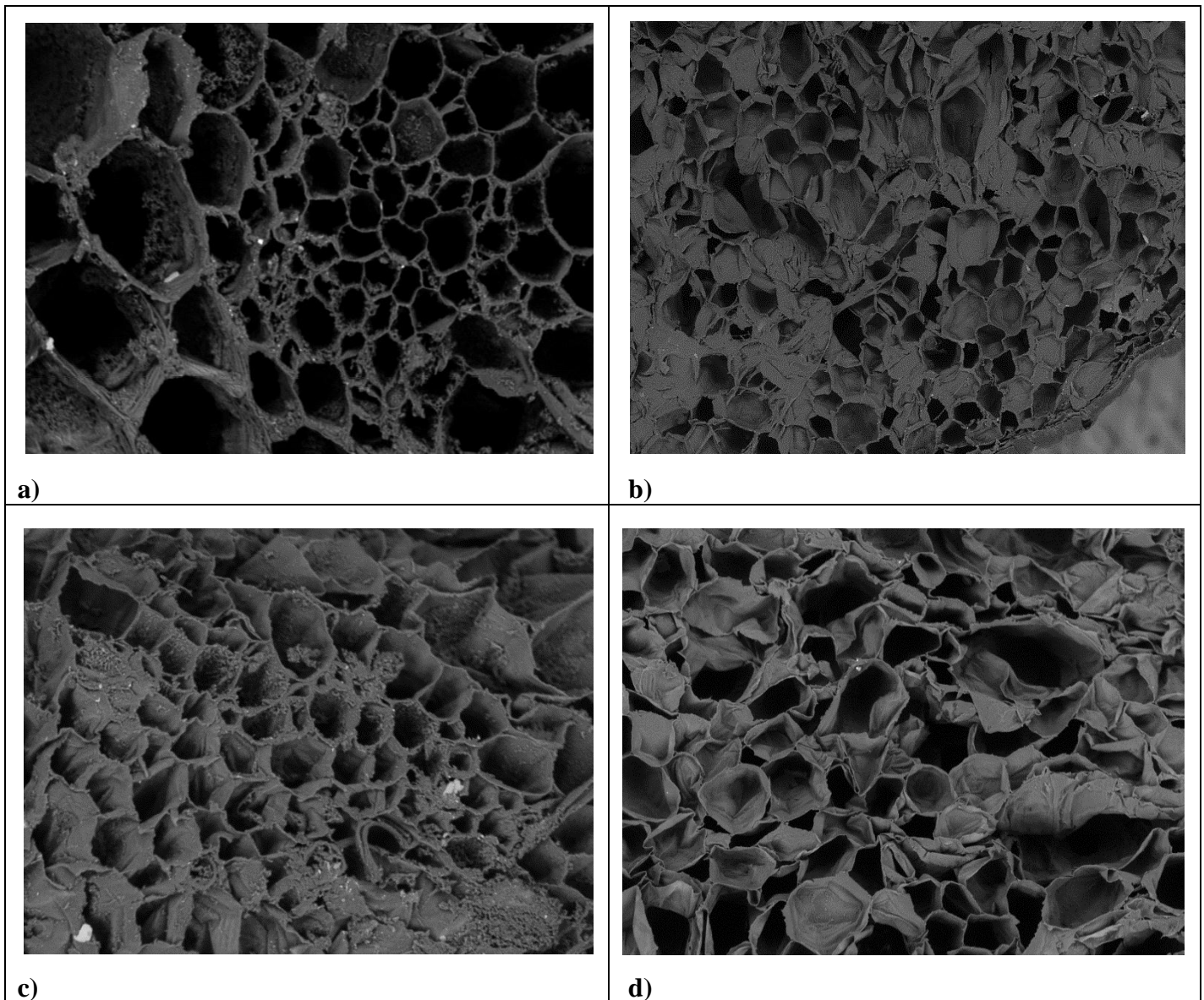
L'effet spongieux augmente le nombre de canaux microscopiques ou de pores à la surface de l'aliment (**Sharma et Dash, 2019**).

### 3.2. Cinétique du séchage

Les données expérimentales du taux d'humidité obtenues pour le séchage des tranches de l'ail pour chaque condition opérationnelle ont été tracées en fonction du temps et en utilisant l'équation (1).

La cinétique de séchage a été étudiée jusqu'à une teneur en humidité finale de 12%. Une diminution rapide du MR a été observée au début du processus de séchage pour toutes les tranches de l'ail. Cependant, ce taux de réduction a diminué au fur et à mesure du séchage. Selon la théorie cinétique, le processus de séchage est composé de trois étapes (**Tao et al., 2014**).

Dans la première étape, appelée période d'induction, les mécanismes d'écoulement de l'eau sont couplés.



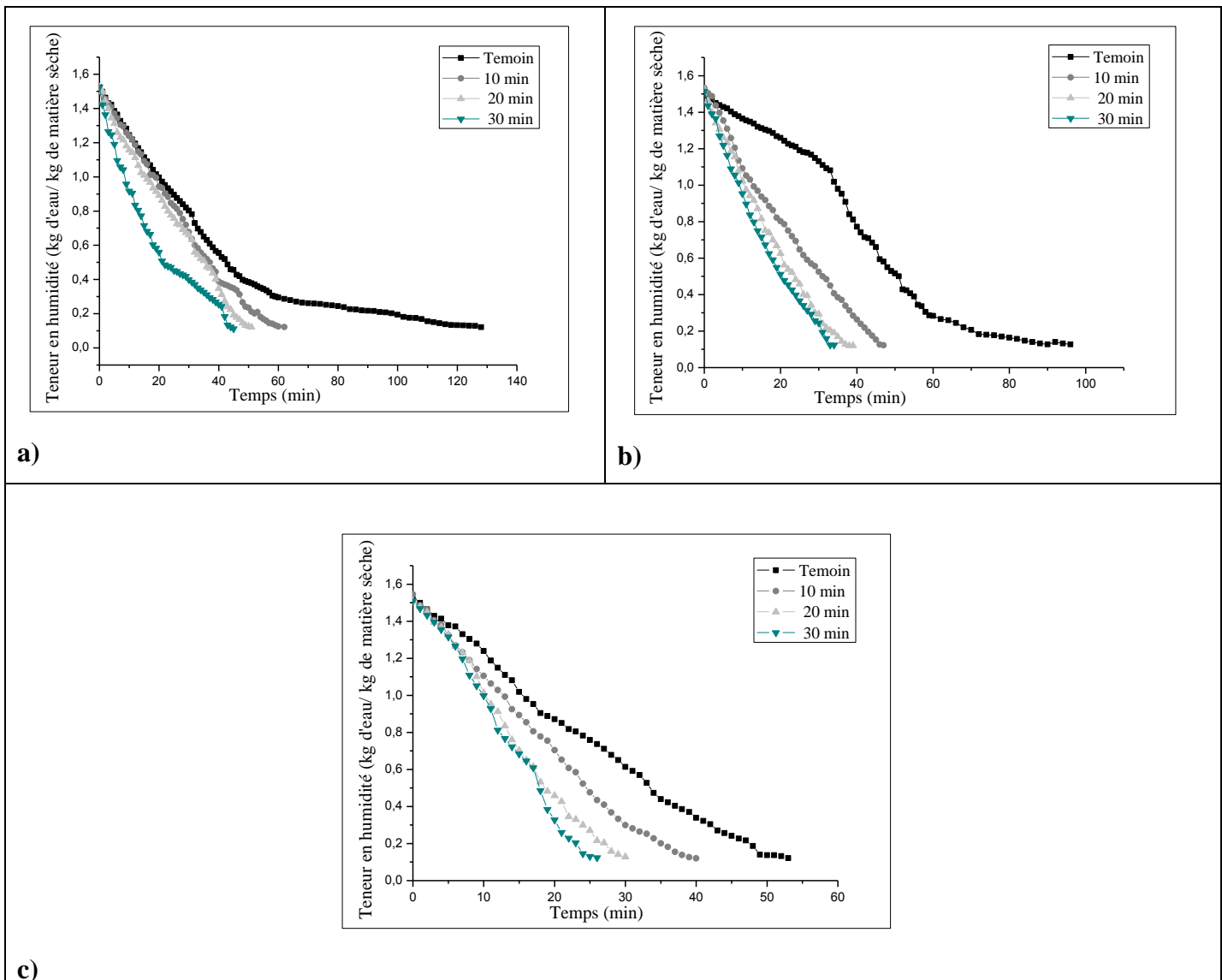
**Figure 45:** Micrographie électronique à balayage des tranches de l’ail prétraités par ultrason: **a)** Non triaté, **b)** ultrason 10 min, **c)** Ultrason 20 min, **d)** ultrason 30 min.

Dans la deuxième étape, la vitesse de séchage atteint une valeur maximale. La troisième étape implique une diminution de la durée du taux de séchage pendant laquelle le flux d’eau de

l’intérieur vers la surface de l’échantillon est inférieur au taux d’évaporation en surface (Magalhães et al., 2017).

La teneur en humidité des tranches de l’ail traités aux ultrasons a diminué plus rapidement que celle des tranches de l’ail non traités (séchés à l’air chaud et celles séchés au microonde assisté à l’air chaud). Cependant, l’application d’ultrasons peut améliorer le processus de déshydratation. Une série des effets associés aux ultrasons sont responsables à l’amélioration du processus de séchage. Les tranches de l’ail sont soumis à des ondes acoustiques qui sont des ondes mécaniques nécessitant la propagation d’un milieu d’échantillon (Tao et al., 2016; Li et Chen, 2017; Tao et al., 2018).

Les compressions et dilatations alternatives générées par les ondes ultrasonores produisent un effet similaire à celui observé lorsqu'une éponge est pressée et relâchée à plusieurs reprises « effet éponge » (Lichtenthaler, 1987; Li et Chen, 2017; Bozkir et al., 2019).



**Figure 46:** Influence d'ultrason et de la température sur la teneur en humidité des tranches d'ail lors du séchage au SMAC: **a)** à 50, **b)** à 60 et **c)** à 70°C.

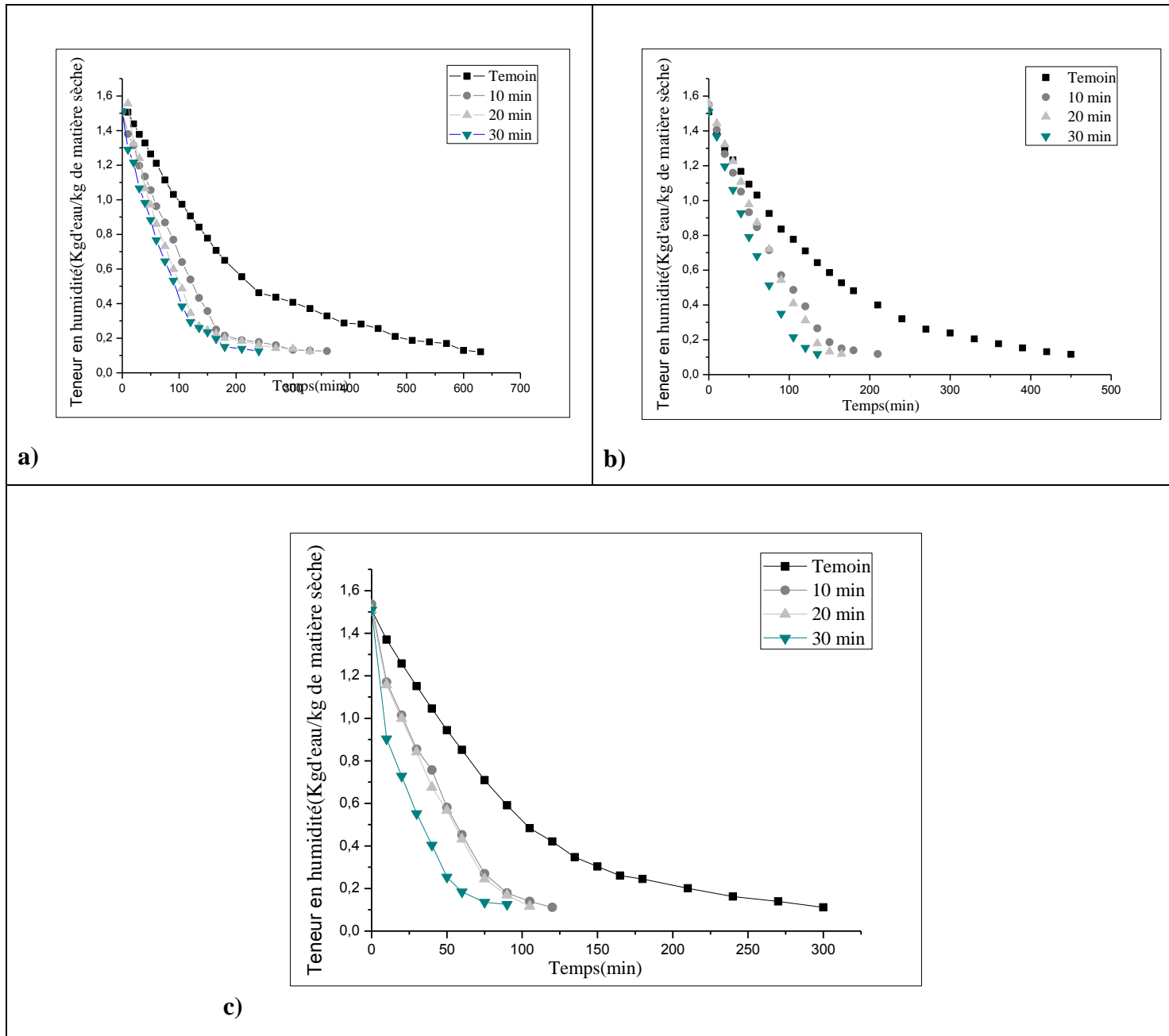
Cet effet éponge provoque la libération rapide de l'humidité à travers les canaux naturels ou d'autres canaux créés par la propagation des ondes de la partie interne vers la partie extérieure (Benzie et Strain, 1996; Tao et al., 2016; Li et Chen, 2017).

Fuente-Blanco et al., (2006); ont également rapporté que la cavitation produite par ultrasons était bénéfique pour l'élimination de l'humidité fortement attachée.

En outre, la réduction d'humidité la plus élevée a été observée dans les tranches de l'ail prétraités pendant 10min. Nowacka et Wedzik, (2016); ont étudié la structure de la carotte prétraitée par



ultrasons (10, 20 et 30min) et ont découvert que les micro-canaux sont spécialement développés dans les échantillons exposés à des temps de prétraitement plus courts (10 min).



**Figure 47:** Influence de l'ultrason et de la température sur la teneur en humidité des tranches de l'ail lors du séchage au SC: a) à 50, b) à 60 et c) à 70°C.

Ce résultat pourrait montrer que les micro-canaux ont été créés au début du prétraitement par ultrasons (10min) et à mesure que le temps d'exposition augmentait, ont été fusionnés les uns avec les autres (cellules voisines) pour former des espaces plus grands. Cependant, le nombre de micro-canaux était probablement plus élevé au début de traitement par ultrason (10 min) qu'à la fin du

traitement de 30 min. Ce nombre plus élevé a finalement augmenté la réduction d'humidité dans les échantillons (Kroehnke et al., 2018).

Comme prévu, la température de séchage a affecté la cinétique de séchage pour toutes techniques de séchage (séchage à l'air chaud et séchage par micro-onde assisté à l'air chaud) (figure 48 et 49) en augmentant la température le processus de séchage est accélérée. La température plus élevée augmente à la fois la mobilité de l'eau à l'intérieur du produit et l'énergie disponible dans le milieu pour l'évaporation de l'eau qui facilite le processus de séchage (Do Nascimento et al., 2016). Lors du séchage par microonde assisté à l'air chaud, la chaleur produite à l'intérieur du matériel biologique a provoqué une augmentation rapide de la température par rapport au séchage par convection à l'air chaud.

### 3.2.1. Réduction du temps

Le temps de séchage diminue avec l'augmentation de la température de séchage. La réduction du temps de séchage est très importante pour l'industrie alimentaire, en particulier pour les produits contenant des substances thermolabiles.

Le séchage par microonde assisté à l'air chaud permet de réduire le temps de séchage de 79.68%, 78.66% et de 82.33% par rapport au séchage à l'air chaud aux températures 50°C, 60°C et 70°C, respectivement. Il est clairement évident que l'implication de l'énergie des micro-ondes pendant le processus de séchage augmente l'évaporation de l'humidité des molécules d'eau (MD Salim et al., 2016). Des résultats similaires ont été rapportés pour le *Moringa oleifera* (Dev et al., 2011) et les tranches de potiron (Alibas, 2007).

En outre, le temps de séchage était plus court pour les tranches de l'ail prétraitées par ultrason comparativement aux tranches de l'ail non prétraités pour les deux méthodes de séchage (séchage à l'air chaud et séchage par microonde assisté à l'air chaud). Le prétraitement par ultrason a réduit de 30 à 57% le temps de séchage requis pour les échantillons conventionnellement séchés. Tant que, il a réduit de 24 à 65% le temps de séchage requis pour les échantillons séchés à microonde assisté à l'air chaud. La réduction du temps de séchage était également dans les limites observées pour les autres fruits (40–70%). Ortuño et al., (2010) et Ozuna et al., (2011) ; ont trouvé une réduction de temps de 40% pour les cubes de pomme de terre et de 72% pour les cylindres d'aubergine. Tandis que, Fernandes et Rodrigues, (2008a) et Fernandes et Rodrigues, (2008b); ont trouvé une réduction du temps de séchage de 23% et 39% pour les cubes de sapotas et les cubes de melon respectivement.

La réduction du temps de séchage après l'application par ultrasons a été montrée par les implosions asymétriques des bulles de cavitation proches d'une surface solide générant des microjets dans la direction de la surface pouvant affecter le transfert de masse (Çakmak et al., 2016). En d'autres termes, en suivant l'effet des ultrasons sur le tissu des échantillons, les membranes cellulaires

et les parois s'effondrent, un espace intercellulaire plus grand est créé, les cellules sont réunies et des canaux se forment. Dans de telles conditions, le taux de transfert de masse et la diffusion d'humidité de l'intérieur de l'échantillon à sa surface augmentent pendant le séchage et par conséquent, les tranches sèchent plus rapidement (**Dehsheikh et Taghian, 2019**).

L'efficacité de l'application par ultrasons diminuait à mesure que la température de séchage augmentait.

L'application des ultrasons pendant le séchage a également eu un effet important sur la cinétique de séchage, réduisant le temps de séchage. Cette influence dépend de la température de l'air utilisée. Lorsque la température de séchage a été de 50°C, temps de séchage est de 630min, 360 min, 300min et 240min pour SC, SC+ US1, SC+ US2 et SC+ US3, respectivement. D'autre part, pour les échantillons séchés à 60 °C, le temps de séchage réduit de 450min à 210min dans SC+US1, 175 min pour les expériences SC+ US2 et 135 min pour les expériences SC+ US3. Cependant, cet effet était plus faible à la température de séchage de 70°C soit la réduction du temps de séchage 120 min, 105min et 90min pour SC+US1 et SC+ US2 et SC+US3, respectivement. Les mêmes résultats ont trouvé pour les échantillons séchés au microonde assisté à l'air chaud.

Ces résultats sont en accord avec les résultats de **Rodríguez et al., (2014a)**; qui ont utilisé une application à ultrasons (30,8 kW/m<sup>3</sup>), réduisant le temps de séchage des pommes de 54, 46 et 17% lorsque le séchage a été effectué à 30, 50 et 70°C respectivement.

Une explication possible de ce fait peut être trouvée dans la quantité d'énergie relative fournie par l'air de séchage et les ultrasons. Ainsi, les effets des ultrasons sur le taux de séchage sont significatifs à basses températures, lorsque l'énergie fournie par l'air de séchage est faible.

Cependant, à des températures plus élevées, le niveau d'énergie plus élevé fourni par l'air de séchage rend l'énergie ultrasonore fournie négligeable et, de ce fait, les effets des ultrasons sont masqués. Par conséquent, l'application des ultrasons peut présenter un potentiel considérable pour améliorer le processus de séchage à basse température (**García-Pérez et al., 2013; Rodríguez et al., 2014; Musielak et al., 2016**).

Une série des études a également validé la tendance à ce qu'en augmentant la température, le pourcentage du temps de séchage raccourci par ultrasons diminue (**Rodríguez et al., 2014; Santacatalina et al., 2014; Kowalski et al., 2017**). **La Fuente et al., (2017)**; ont également appliqué un prétraitement aux ultrasons avant le séchage à l'air chaud de la banane. Le temps de séchage a été réduit de 28% et 18% à 50 et 60°C, respectivement. **Gamboa-Santos et al., (2014)**; ont comparé le séchage des fraises à 40, 50, 60 et 70°C prétraités par ultrason, ils ont trouvé qu'à basse température (40, 50°C), le pourcentage du temps de séchage réduit par ultrasons était supérieur à celui à haute température (60, 70°C).

### 3.3. Modélisation des courbes du séchage

L'effet des ultrasons sur le processus de séchage peut être déterminé à l'aide d'un modèle mathématique décrivant la cinétique du séchage des tranches de l'ail prétraités par ultrasons. À cette fin, sept modèles différents ont été utilisés. Les équations et les paramètres associés corrélés à ces modèles sont présentés dans le tableau 11. Comme montre le tableau 19, les valeurs de  $R^2$  étaient supérieures à 0,99. Ceci indique un bon ajustement, alors les données prédites étaient proches des données expérimentales de séchage. Cela signifie que tous les modèles établis ont décrit avec succès la relation entre le temps et la RM.

Les modèles Two-term; Henderson et Pabis; et Midilli et *al.* présentaient le meilleur ajustement pour les données de séchage obtenues. L'obtention de données de cinétique de séchage et leur modélisation sont nécessaires pour concevoir, simuler et optimiser le processus ou l'équipement de séchage. **Mahmoud Younis et al., (2018)**; ils ont trouvé que le modèle Henderson et Pabis modifié a présenté la meilleure prédiction du séchage des tranches d'ail prétraitées par ultrason. Ainsi, **chen et al., (2020)**; ils ont trouvé que le modèle Midilli et *al.* était le meilleur pour décrire la cinétique de séchage des tranches de l'ail.

**Tableau19:** Qualité d'adaptation des modèles du séchage aux SMAC prétraité par ultrason aux différentes températures.

Model 50°C	Coefficients	Témoin	10 min	20 min	30 min
MR = exp(-k·t)	R <sup>2</sup>	0,9931	0,9777	0,9762	0,9959
	χ <sup>2</sup>	0,0010	0,0032	0,0027	0,0004
	RMSE	0,0033	0,0067	0,0064	0,0029
MR = a exp(-k·t)	R <sup>2</sup>	0,994	0,9848	0,9793	0,9966
	χ <sup>2</sup>	0,0009	0,0022	0,0024	0,0003
	RMSE	0,0031	0,0055	0,0060	0,0027
MR=a exp(-k·t <sup>n</sup> )+b·t	R <sup>2</sup>	0,9951	0,9981	0,9983	1
	χ <sup>2</sup>	0,0007	0,0002	0,0002	0,0004
	RMSE	0,0028	0,0019	0,0017	0,0030
MR = a exp(-k <sub>0</sub> ·t) + b exp(k <sub>1</sub> ·t)	R <sup>2</sup>	0,9951	0,9848	0,9808	1
	χ <sup>2</sup>	0,0007	0,0022	0,0024	0,0004
	RMSE	0,0028	0,0056	0,0061	0,0030
MR = a exp(-k·t) + c	R <sup>2</sup>	0,9951	0,9981	0,9981	0,9949
	χ <sup>2</sup>	0,0007	0,0002	0,0026	0,0003
	RMSE	0,0028	0,0020	0,0062	0,0024
MR = a exp(-k·t) + b exp(-g·t) + c exp(-h·t)	R <sup>2</sup>	0,9951	0,9848	0,9793	0,9969
	χ <sup>2</sup>	0,0007	0,0023	0,0025	0,0003
	RMSE	0,0028	0,0057	0,0062	0,0027
MR = 1 + a·t + b·t <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	0,9929	0,9985	1	0,9988
	χ <sup>2</sup>	0,00111	0,0004	0,0002	0,0016
	RMSE	0,0034	0,0024	0,0017	0,00573
Model 60°C	Coefficients	Témoin	10 min	20 min	30 min

MR = exp(-k·t)	R <sup>2</sup>	0,937	0,9856	0,9839	0,9911
	χ <sup>2</sup>	0,0124	0,0016	0,0017	0,0009
	RMSE	0,0125	0,0050	0,0054	0,0046
MR = a exp(-k·t)	R <sup>2</sup>	0,9556	0,9901	0,9879	0,9939
	χ <sup>2</sup>	0,0089	0,0011	0,0013	0,0006
	RMSE	0,0106	0,0041	0,0047	0,0039
MR=a exp(-k·t <sup>n</sup> )+b·t	R <sup>2</sup>	0,9769	0,9990	0,9993	0,9995
	χ <sup>2</sup>	0,0047	0,0001	8.15331E-05	5.71417E-05
	RMSE	0,0077	0,0013	0,0011	0,0011
MR = a exp(-k <sub>0</sub> ·t) + b exp(k <sub>1</sub> ·t)	R <sup>2</sup>	0,9556	0,9901	0,9879	1
	χ <sup>2</sup>	0,0091	0,0011	0,0013	0,0007
	RMSE	0,0107	0,0042	0,0048	0,0040
MR = a exp(-k·t) + c	R <sup>2</sup>	0,9769	0,998575	0,9993	0,9981
	χ <sup>2</sup>	0,0048	8.5945E-05	8.4559E-05	0,0002
	RMSE	0,0078	0,0011	0,0012	0,0025
MR = a exp(-k·t) + b exp(-g·t) + c exp(-h·t)	R <sup>2</sup>	0,9556	0,9901	0,9879	0,9939
	χ <sup>2</sup>	0,00941	0,0012	0,0014	0,0007
	RMSE	0,0109	0,0043	0,0049	0,0041
MR = 1 + a·t + b·t <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	0,9783	0,9988	0,9994	0,9938
	χ <sup>2</sup>	0,0044	0,0010	0,00025	0,0020
	RMSE	0,0075	0,0040	0,0020	0,0067
<b>Model 70°C</b>					
MR = exp(-k·t)	<b>Coefficients</b>	<b>Témoin</b>	<b>10 min</b>	<b>20 min</b>	<b>30 min</b>
	R <sup>2</sup>	0,9755	0,9768	0,9625	0,95
	χ <sup>2</sup>	0,0039	0,0032	0,0053	0,0068
MR = a exp(-k·t)	RMSE	0,0085	0,0081	0,01157	0,0135
	R <sup>2</sup>	0,9848	0,9839	0,9777	0,9665
	χ <sup>2</sup>	0,0025	0,0023	0,0032	0,0047
MR=a exp(-k·t <sup>n</sup> )+b·t	RMSE	0,0068	0,0068	0,0090	0,0113
	R <sup>2</sup>	0,9987	0,9985	0,9962	1
	χ <sup>2</sup>	0,0002	0,0002	0,0005	0,0005
MR = a exp(-k <sub>0</sub> ·t) + b exp(k <sub>1</sub> ·t)	RMSE	0,0020	0,0021	0,0038	0,0040
	R <sup>2</sup>	0,9848	0,9839	0,9777	0,9736
	χ <sup>2</sup>	0,0026	0,0024	0,0034	0,0050
MR = a exp(-k·t) + c	RMSE	0,0070	0,0070	0,0093	0,0117
	R <sup>2</sup>	0,9987	0,9985	0,9962	0,9920
	χ <sup>2</sup>	0,0002	0,0002	0,0006	0,0006
MR = a exp(-k·t) + b exp(-g·t) + c exp(-h·t)	RMSE	0,0021	0,0021	0,0039	0,0041
	R <sup>2</sup>	0,9848	0,9839	0,9838	0,9665
	χ <sup>2</sup>	0,0027	0,0025	0,0037	0,0053
MR = 1 + a·t + b·t <sup>2</sup>	RMSE	0,0071	0,0071	0,0096	0,0120
	R <sup>2</sup>	0,9993	0,9988	0,9965	0,9963
	χ <sup>2</sup>	0,0025	0,0005	0,0005	0,0005
	RMSE	0,0069	0,0032	0,0038	0,0038

**Tableau 20:** Qualité d'adaptation des modèles du séchage au SC prétraité par ultrason aux différentes températures.

Model 50°C	Coefficients	Témoin	10 min	20 min	30 min
MR = exp(-k·t)	R <sup>2</sup>	0,9971	0,9934	0,9943	0,9968
	χ <sup>2</sup>	0,0001	0,0003	0,0002	0,0001
	RMSE	0,00135	0,0023	0,0020	0,0019
MR = a exp(-k·t)	R <sup>2</sup>	0,9978	0,9943	0,9945	1
	χ <sup>2</sup>	0,0001	0,0003	0,0002	0,0001
	RMSE	0,0012	0,0021	0,0020	0,0019
MR=a exp(-k·t <sup>n</sup> )+b·t	R <sup>2</sup>	0,9987	1	1	1
	χ <sup>2</sup>	7,80728E-05	0,0003	0,0002	0,0001
	RMSE	0,0009	0,0023	0,0021	0,0019
MR = a exp(-k <sub>0</sub> ·t) + b exp(k <sub>1</sub> ·t)	R <sup>2</sup>	0,9987	1	1	0,9968
	χ <sup>2</sup>	7,89308E-05	0,0003	0,0003	0,0001
	RMSE	0,0009	0,0023	0,0021	0,0019
MR = a exp(-k·t) + c	R <sup>2</sup>	0,9987	1	1	0,9969
	χ <sup>2</sup>	7,97905E-05	0,0003	0,0003	0,0001
	RMSE	0,0009	0,0022	0,0021	0,0019
MR = a exp(-k·t) + b exp(-g·t) + c exp(-h·t)	R <sup>2</sup>	0,9987	0,9943	0,9962	0,9968
	χ <sup>2</sup>	8,07045E-05	0,0003	0,0002	0,0002
	RMSE	0,0009	0,0022	0,0017	0,0020
MR = 1 + a·t + b·t <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	0,9941	0,9961	0,9902	0,9978
	χ <sup>2</sup>	0,0003	0,0004	0,0005	0,0001
	RMSE	0,0020	0,0025	0,0029	0,0016
Model 60°C	Coefficients	Témoin	10 min	20 min	30 min
MR = exp(-k·t)	R <sup>2</sup>	0,9993	0,9918	0,9756	0,9869
	χ <sup>2</sup>	3,49964E-05	0,0004	0,0012	0,0006
	RMSE	0,0006	0,0025	0,0045	0,0038
MR = a exp(-k·t)	R <sup>2</sup>	0,9996	0,9954	0,9841	0,9903
	χ <sup>2</sup>	2,2443E-05	0,0002	0,0008	0,0005
	RMSE	0,0005	0,0018	0,0037	0,0033
MR=a exp(-k·t <sup>n</sup> )+b·t	R <sup>2</sup>	1	1	0,9955	0,9986
	χ <sup>2</sup>	3,59173E-05	0,0002	0,0001	7,61767E-05
	RMSE	0,0006	0,0020	0,0018	0,0013
MR = a exp(-k <sub>0</sub> ·t) + b exp(k <sub>1</sub> ·t)	R <sup>2</sup>	0,9998	0,9954	0,9841	0,9903
	χ <sup>2</sup>	1,31985E-05	0,0002	0,0008	0,0005
	RMSE	0,0004	0,0019	0,0037	0,0034
MR = a exp(-k·t) + c	R <sup>2</sup>	1	1	1	1
	χ <sup>2</sup>	3,68881E-05	0,0004	0,00085	0,0005
	RMSE	0,0006	0,0025	0,0038	0,0034
MR = a exp(-k·t) + b exp(-g·t) + c exp(-h·t)	R <sup>2</sup>	1	1	1	1
	χ <sup>2</sup>	3,73934E-05	0,0004	0,0013	0,0007
	RMSE	0,0006	0,0026	0,0048	0,0040
MR = 1 + a·t + b·t <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	0,997	0,9986	0,9969	0,9992
	χ <sup>2</sup>	0,0001	0,0004	0,0001	0,0007
	RMSE	0,0015	0,0025	0,0016	0,0039
Model 70°C	Coefficients	Témoin	10 min	20 min	30 min
MR = exp(-k·t)	R <sup>2</sup>	0,998	0,9945	0,9952	0,9905
	χ <sup>2</sup>	0,0001	0,0002	0,0002	0,0003
	RMSE	0,0014	0,0020	0,0022	0,0032

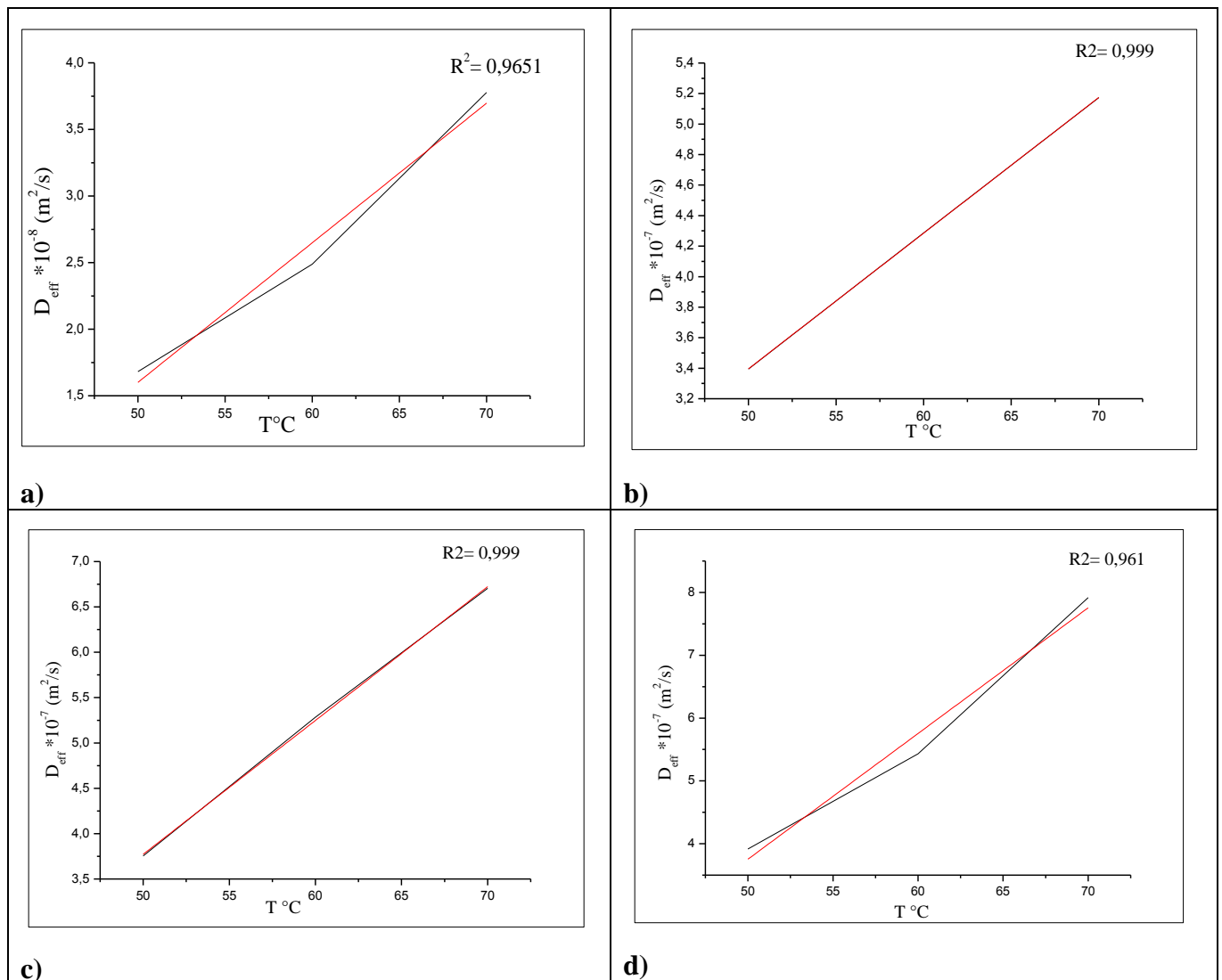
MR = a exp(-k·t)	R <sup>2</sup>	1	1	0,9952	0,9922
	χ <sup>2</sup>	0,00012	0,0002	0,0002	0,0003
	RMSE	0,0015	0,0021	0,0022	0,0029
MR=a exp(-k·t <sup>n</sup> )+b·t	R <sup>2</sup>	1	0,9962	0,9976	0,9942
	χ <sup>2</sup>	0,0001	0,0001	0,0001	0,0002
	RMSE	0,0015	0,0018	0,0016	0,0026
MR = a exp(-k <sub>0</sub> ·t) + b exp(k <sub>1</sub> ·t)	R <sup>2</sup>	1	0,9946	1	1
	χ <sup>2</sup>	0,0001	0,0002	0,0002	0,0004
	RMSE	0,0015	0,0021	0,0023	0,0033
MR = a exp(-k·t) + c	R <sup>2</sup>	1	1	1	1
	χ <sup>2</sup>	0,0001	0,0002	0,0002	0,0004
	RMSE	0,0015	0,0021	0,0023	0,0034
MR = a exp(-k·t) + b exp(-g·t) + c exp(-h·t)	R <sup>2</sup>	1	1	1	1
	χ <sup>2</sup>	0,0001	0,0002	0,0002	0,0004
	RMSE	0,0015	0,0022	0,0024	0,0034
MR = 1 + a·t + b·t <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	0,9962	0,9982	0,9987	0,9954
	χ <sup>2</sup>	0,0003	0,0002	0,0002	0,0076
	RMSE	0,0026	0,0022	0,0025	0,0143

### 3.4. Diffusivité effective

Les valeurs ( $D_{eff}$ ) des tranches de l'ail séchées dans différentes conditions expérimentales ont été calculées à l'aide d'Equation (6) .

Les valeurs des coefficients de diffusion effectifs ont augmenté pour les tranches de l'ail prétraités par rapport aux tranches de l'ail non traités. L'application ultrasonique forme également des ondes de choc et un jet en continu, ce qui contribue également à la dégradation des cellules et à la création de canaux microscopiques dans la structure alimentaire. Ces effets entraînent une augmentation plus élevée de la diffusivité effective de l'eau ( **Rodríguez et al., 2014; Romero et Yopez, 2015**).

En général, en augmentant le temps d'ultrason de 10, 20 et 30 min, le  $D_{eff}$  des tranches de l'ail a augmenté de 4,89, 1,54 et 1,38% respectivement pour les échantillons séchés à l'air chaud par rapport au non prétraités. Pour le séchage par microonde assisté à l'air chaud, l'augmentation de  $D_{eff}$  des tranches traités par ultrason (10,20 et 30min) est d'ordre 5,09, 2,67 et 1,12% respectivement par rapport au tranches non traité. L'augmentation de  $D_{eff}$  des échantillons de l'ail prétraités pendant 10 min était considérable par rapport aux autres échantillons de temps (20 et 30 min) ce qui a été attribué à une formation plus importante de micro-canaux au cours de cette période de prétraitement. Les résultats obtenus dans la présente étude corroborent ceux rapportés précédemment pour les échantillons prétraités aux ultrasons de melons (**Rodrigues et Fernandes, 2007**), pomme de terre (**Dehghannya et al., 2019**), banane (**Azoubel et al., 2010**), pomme (**Nowacka et al., 2012**) et prune (**Dehghannya et al., 2015**). En ce qui concerne les effets de l'utilisation des ultrasons sur  $D_{eff}$ , par rapport à température du séchage, A des températures 50 et 60 °C, l'augmentation était de 1,6 à 1,8 fois pour les tranches de l'ail séchées à l'air chaud, et était de 2,4 à 2,2 fois pour les échantillons séchés à la microonde assisté à l'aire chaud. Tant que, l'augmentation est plus faible lorsque la température de séchage était de 70 °C (1,3 fois pour AIR+US et 1,4 fois pour SAMC+US).



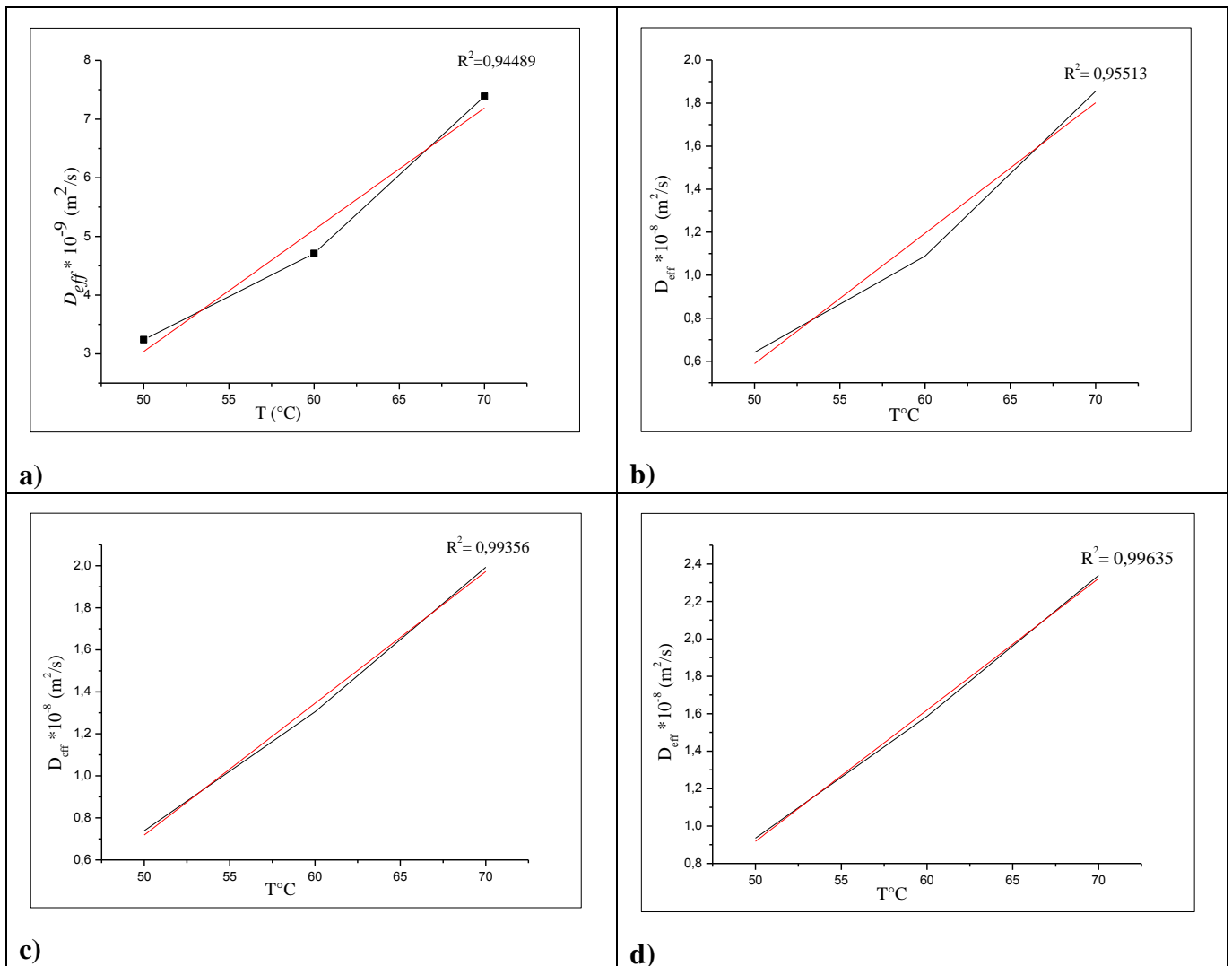
**Figure 48:** Coefficient de diffusivité efficace ( $D_{eff}$ ) aux différentes températures (séchage par microonde assisté à l'air chaud).

- a)**  $D_{eff}$  pour le contrôle, **b)**  $D_{eff}$  pour le prétraitement (10 min),  
**c)**  $D_{eff}$  pour le prétraitement (20 min), **d)**  $D_{eff}$  pour le prétraitement (30 min).

Un comportement similaire a également signalé par **García-Pérez et al., (2007)**; pour le séchage des cubes de carotte prétraités par ultrason,  $D_{eff}$  était élevé de 1,6 fois à  $30^{\circ}C$ , 1,4 fois à  $50^{\circ}C$  et à de 1,1 fois  $70^{\circ}C$ . Ainsi, pour le séchage des pommes, des résultats similaires ont été obtenus dont les valeurs de  $D_{eff}$  étaient 2,4, 2,2 et 1,4 fois plus élevées à des températures de  $30$ ,  $50$  et  $70^{\circ}C$  respectivement (**Rodríguez et al., 2014**).

Ces résultats montrent que l'application par ultrasons peut être un moyen intéressant d'obtenir le même taux de séchage, voire un taux de séchage plus élevé, en utilisant des conditions de séchage plus douces qui peuvent aider à conserver la bioactivité des composés naturels dans les produits séchés (**do Nascimento et al., 2016**).





**Figure 49:** Coefficient de diffusivité efficace ( $D_{eff}$ ) aux différentes températures (séchage à l'air chaud): a)  $D_{eff}$  pour le contrôle, b)  $D_{eff}$  pour le prétraitement (10 min), c)  $D_{eff}$  pour le prétraitement (20 min), d)  $D_{eff}$  pour le prétraitement (30 min).

### 3.5. Energie d'activation

L'énergie d'activation pendant le processus de séchage doit être pris en compte lors du choix d'une technique de séchage afin de réduire le coût du processus utilisé. Les valeurs d' $E_a$  pour toutes les conditions expérimentales variaient de 13,29 à 40,56 kJ/mol. Ces valeurs se situent dans la plage rapportée **Younsi et al., (2018)**; pour le séchage des tranches de l'ail.

Il a été constaté que l'utilisation d'ultrasons avant le séchage par convection en tant que sources d'énergie supplémentaires pouvait considérablement réduire l' $E_a$ . Une valeur aussi faible de l' $E_a$  dans le SMAC+US est due à l'application simultanée de MA et d'US.

Ces résultats sont liés que ce prétraitement permet de réduire le temps de séchage dans un pourcentage élevé.

Des résultats similaires ont également été rapportés par **Sledz et al., (2016)**; lorsque les ultrasons étaient utilisés pour traiter les feuilles de persil avant le séchage. En raison de la réduction de la

consommation d'énergie, le prétraitement par ultrasons permet également de réduire le coût de fabrication du thé en feuilles de mûrier (Romero et Yopez, 2015).

### 3.6. Couleur

Les colorants naturels présents dans les fruits et légumes sont facilement détruits. La couleur du pigment naturel est instable et sensible aux divers facteurs. Le changement de couleur des produits séchés est également un paramètre clé à prendre en compte pour juger la qualité des aliments.

Les paramètres de couleur des tranches de l'ail séchées dans différentes conditions expérimentales sont présentés dans les figures 50 et 51.

Les tranches de l'ail frais étaient caractérisées par une légèreté élevée ( $L^* = 74.70 \pm 3.50$ ), avec une tendance au vert et au jaune ( $a^* = -3.4 \pm 0.40$  et  $b^* = 23.86 \pm 0.76$ ) respectivement.

Le  $L^*$  des échantillons séchés variait de 58,3 à 72,74,  $b^*$  variait de 15.73 à 23,7 et  $a^*$  variait de 4,36 à 0.11. Les valeurs de  $L^*$  étaient faibles et les valeurs de  $b^*$  significativement plus élevées ( $p < 0,05$ ) pour tous les échantillons séchés par rapport aux échantillons frais, indiquant que le séchage diminuait la luminosité et augmentait le jaunissement des tranches d'ail (Tao et al., 2018).

Les tranches de l'ail séchés à l'air chaud étaient plus foncées que les échantillons séchés par microonde assisté à l'air chaud. L'aspect plus foncé peut être causé par l'exposition prolongée à la chaleur pendant le séchage. Contreras et al., (2008); ont indiqué qu'une durée de traitement plus courte associée à une température de l'air plus élevée ou à une application par micro-ondes entraîne moins de changements de couleur dans les échantillons séchés.

Par contre, les échantillons prétraités par ultrason présentaient les valeurs  $L^*$  les plus élevées. Une observation intéressante est que les ultrasons ont augmenté de manière significative la légèreté de toutes les tranches de l'ail séchés.

Cela signifiait que le prétraitement par ultrason pouvait affecter la légèreté des tranches de l'ail séchés, ce qui peut être dû au temps de séchage plus court. Ces résultats sont en accord avec les résultats obtenus par Tao et al., (2018); qu'ils ont montré que les tranches d'ail traitées aux ultrasons avaient une couleur plus blanche que les échantillons séchés à l'air chaud sans prétraitement, en raison de leur valeurs  $L^*$  qui étaient nettement plus élevées.

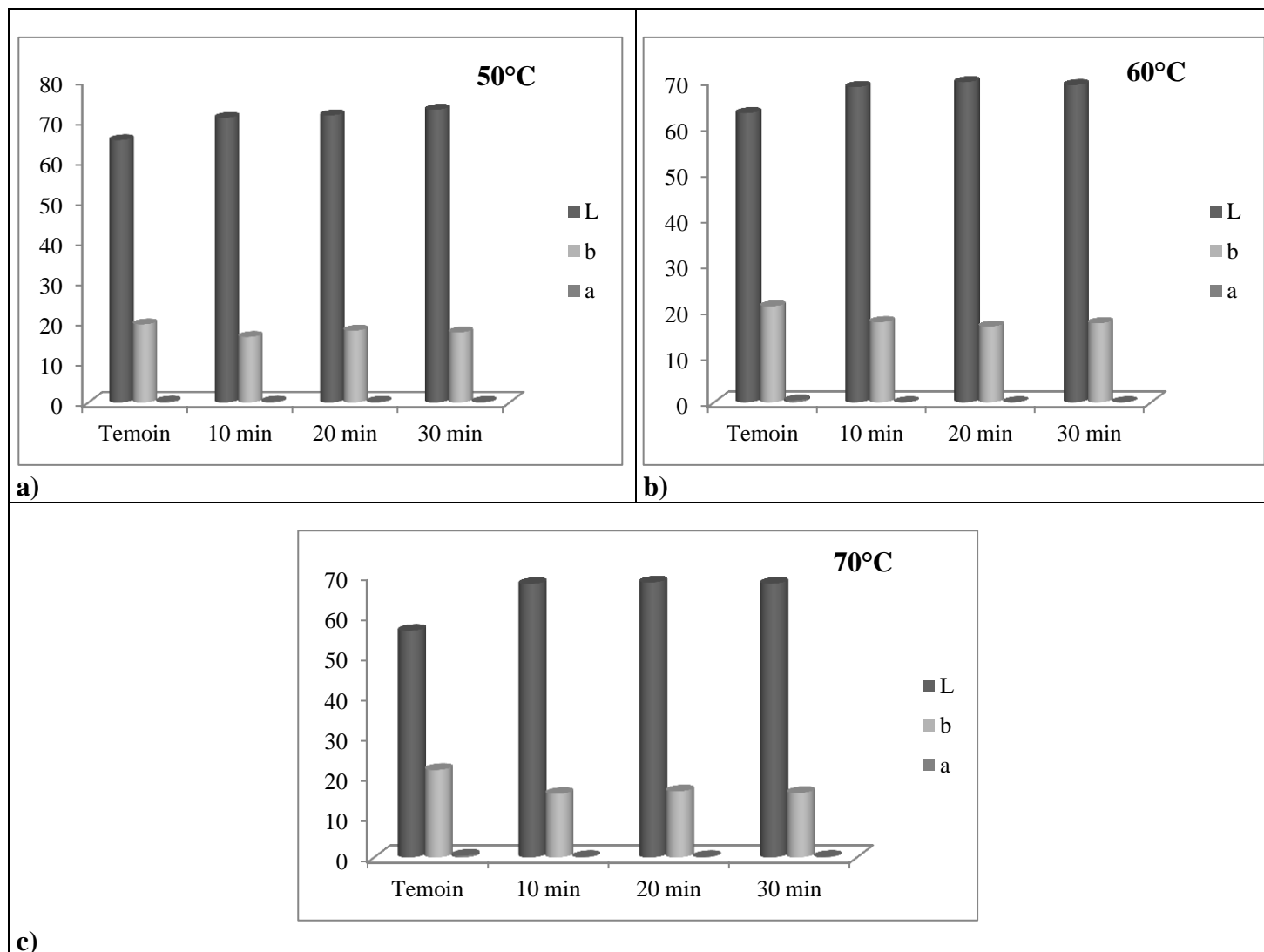
Les valeurs  $a^*$  des tranches de l'ail prétraité par ultrasons ont été diminuées à celle des échantillons témoins. Deng et Zhao, (2008); ont montré que l'application du procédé par ultrasons avant le séchage des tranches de pomme entraînait une augmentation du paramètre de couleur  $L^*$ , une diminution des paramètres de couleur  $a^*$  et  $b^*$  et donc une préservation de la couleur du produit. Ainsi, Rodríguez et al., (2014a); ont prouvé que l'application des ultrasons avant le séchage MW des pommes donnait de meilleurs résultats, une augmentation de la  $L^*$  et une diminution de  $a^*$ . Ozuna et al., (2014); a été déclaré que les ultrasons favorisaient une augmentation de la légèreté et des nuances jaunes de la morue.

La valeur la plus élevée de  $\Delta E$  a été observée pour les échantillons de l'ail séchés uniquement par convection. Cela prouve qu'un séchage à l'air chaud de longue durée provoque une altération significative de la couleur. Les colorants naturels présents dans les légumes et les fruits subissent facilement la destruction (Szadzinska et al., 2017).

Cependant, les tranches de l'ail prétraité par ultrasons présentaient une différence de couleurs ( $\Delta E$ ) la plus faible par rapport aux tranches non traitées. Cela est également dû à la décomposition moindre des polyphénols et d'autres composés bioactifs pendant le séchage, avec une exposition plus courte à l'air. Les images de tranches d'ail séchées dans la figure 52 a également montré que les tranches d'ail séchées à l'air chaud prétraités aux ultrasons avaient une couleur plus blanche que celle des échantillons séchés à l'air chaud seul. Ces résultats en accord avec les résultats observés par Motevali et Hachemi, (2016); qui ont évalué l'effet de 15, 30 et 45 minutes de traitement par ultrasons sur les changements de couleur des tranches de pomme au cours du séchage par convection. Ils ont rapporté que le prétraitement par ultrasons réduisait  $\Delta E$  en raison de la diminution du taux de réactions oxydatives enzymatique.

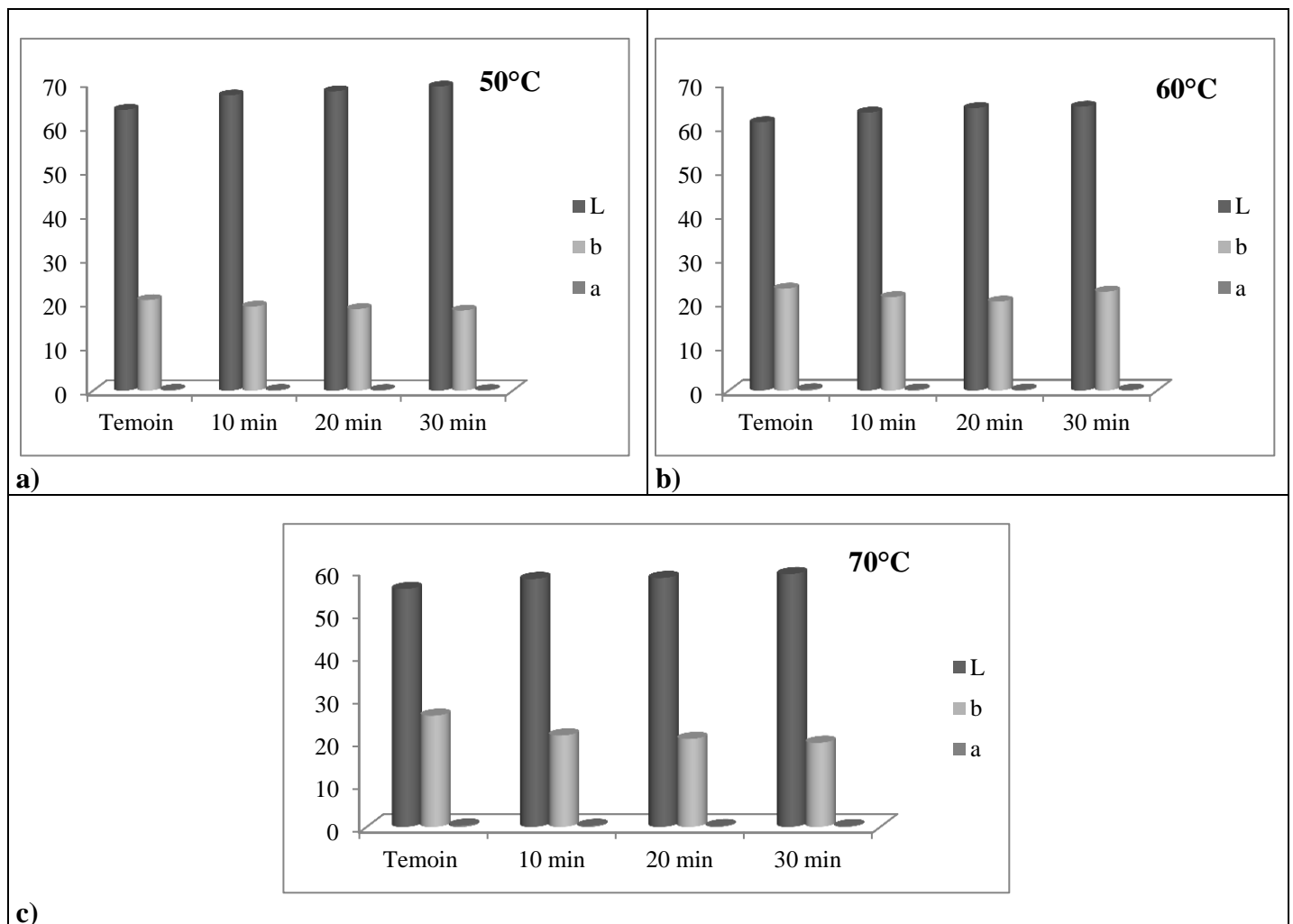


**Figure 50:** Tranches de l'ail séché à l'air chaud avec et sans ultrason:  
**a)** avec ultrason, **b)** sans ultrason.



**Figure 51:** Variation des paramètres de couleur des tranches de l'ail séchés SMAC et prétraité par Ultrason.

Un effet positif des ultrasons sur le changement de couleur a également été obtenu dans le cas du séchage convectif et microonde de la carotte (Kroehnke *et al.*, 2015) et du poivron vert (Szadzińska *et al.*, 2015). Dehsheikh *et al.*, (2019); ont observé une diminution significative (33,6%) du changement total de couleur du séchage convectif des tranches de banane sous prétraitement par ultrasons. Ils pensaient que cela était dû à l'augmentation de la luminosité des échantillons et à la diminution du temps de séchage. Jiang *et al.*, (2016); ont rapporté que le prétraitement par ultrasons peut aider à améliorer la couleur du produit des tranches d'A. bisporus séchées aux micro-ondes sous vide.



**Figure 52:** Variation des paramètres de couleur des tranches de l'ail séchés au SC et prétraité par Ultrason.

### 3.7. Texture

La texture est un autre paramètre important pour l'acceptabilité des aliments, en particulier pour les produits séchés. Au cours du séchage, les tissus alimentaires sont soumis à un stress qui provoque des fissures et des déformations (Dias da Silva et al., 2016).

La dureté des échantillons frais et séchés a été évaluée en calculant la force de pénétration maximale et exprimée en Newton (tableau 21). Les tranches de l'ail frais présentaient des valeurs de dureté d'environ 9.35 N.

Tous les échantillons déshydratés présentaient une augmentation substantielle de la dureté par rapport à l'échantillon frais. Ce fait est dû au transfert simultané de chaleur et d'eau pendant le séchage, ce qui entraîne une tension et un retrait, et augmente la dureté des échantillons déshydratés (Vieira da Silva Júnior et al., 2018; Chen et al., 2020).

Par contre, tous les échantillons prétraités par ultrasons présentaient des valeurs de dureté comprises entre 12.90 et 50.08 N.

La dureté des échantillons diminue avec le prétraitement, ce qui indique que la texture des tranches de l'ail séchés prétraités par ultrason est devenue plus douce par rapport aux échantillons non prétraités. **Chen et al., (2020)**; ont trouvé que les tranches de l'ail séchées et prétraités par ultrason avaient des valeurs de dureté inférieures à celles non prétraités. Un résultat similaire a été obtenu par **Kek et al., (2013)**; pour les goyaves prétraités par ultrasons.

Les ultrasons conduisent à la création des fractures et des micro-canaux lors de vibrations ultrasoniques. Ces derniers ont entraîné une réduction de la force de destruction des échantillons, ce qui favorise la formation d'une tranche séchée plus douce (**Dias da Silva et al., 2016**) comparable à la texture dure des tranches non traitées. Ceci peut être liée au temps de séchage élevé, qui entraîne par conséquent des dommages plus importants à la texture et des valeurs de dureté plus élevées. Ce fait doit avoir influencé la rigidité de la structure et la compression dans les tranches de l'ail non traités

Des résultats similaires ont été trouvés dans les travaux de **Dias da Silva et al., (2016)**; dont lesquels des échantillons de melon déshydratés par osmose prétraités aux ultrasons obtenaient une dureté inférieure (29,76N) par rapport aux échantillons non traités (34,42N). **Dujmic et al., (2013)**; ont observé une diminution significative de la dureté de la poire séchée par l'infrarouge sous prétraitement aux ultrasons (jusqu'à 40,6%).

Il est clair que l'application d'ultrasons avant le séchage peut considérablement améliorer les propriétés texturales des tranches de l'ail séchés.

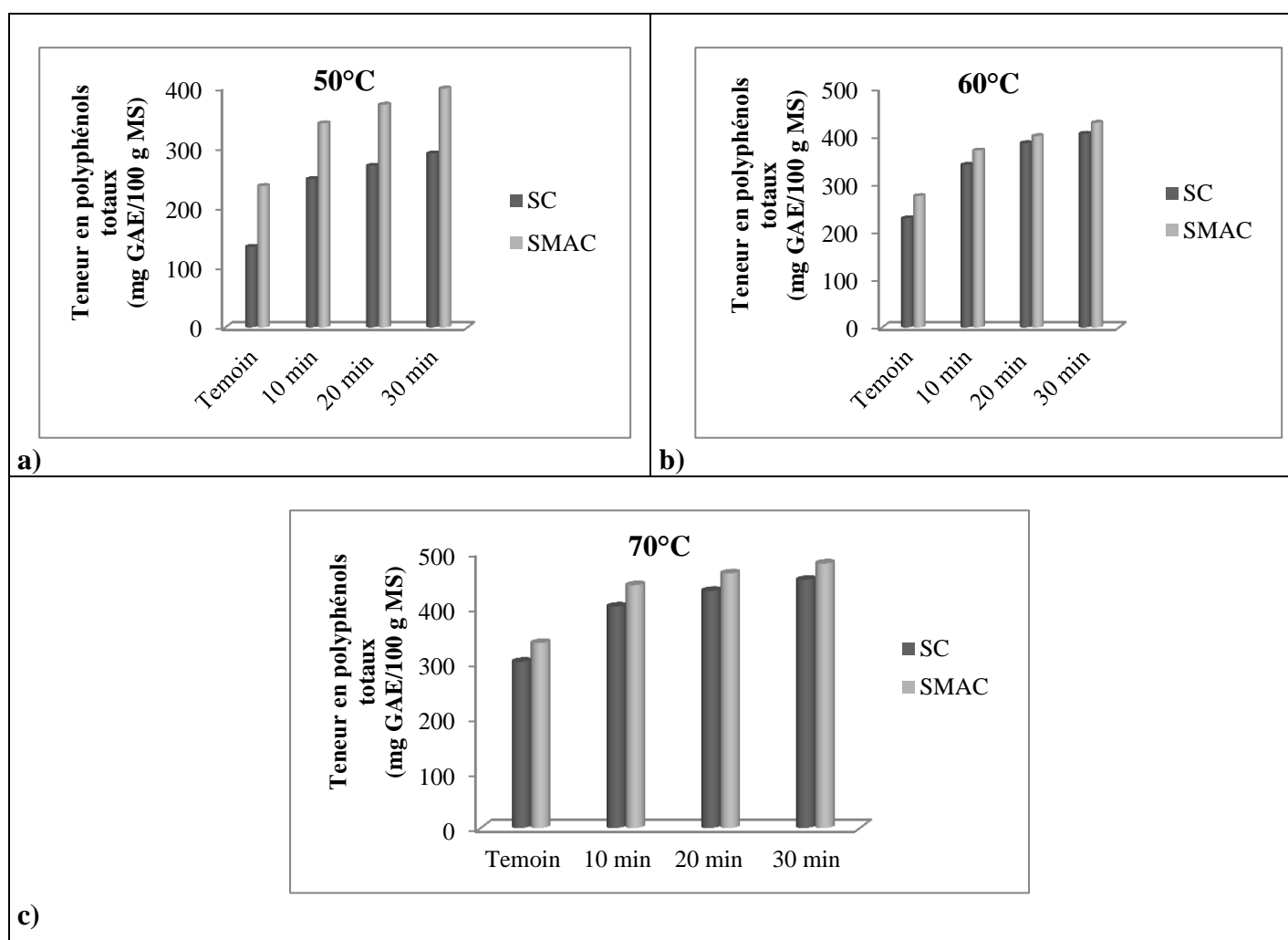
**Tableau 21:** Dureté des tranches de l'ail séchés par les deux méthodes aux différentes Températures.

Température	Echantillon	Texture	
		SC	SMAC
50°C	Control	49.12± 2.09	16.02± 2.09
	10 min	47.10± 2.56	15.52± 2.56
	20 min	30.34± 3.83	12.90± 3.83
	30 min	23.68± 4.03	11.03± 4.03
60°C	Control	49.71± 3.13	20.15± 3.13
	10 min	47.55± 4.83	19.37± 4.83
	20 min	34.03± 2.83	14.89± 2.83
	30 min	25.02± 2.99	12.98± 2.99
70°C	Control	50.08± 3.15	27.66± 3.15
	10 min	49.31± 5.03	26.94± 5.03
	20 min	38.58± 1.83	22.04± 1.83
	30 min	30.74± 5.02	18.74± 5.02

### 3.8. Teneur en Polyphénols totaux

La teneur de TPC calculée est présentée dans la figure 53, pour les tranches de l'ail séchées prétraités et non prétraités aux différentes températures de l'air.

Les échantillons traités aux ultrasons ont montré une augmentation significative ( $p < 0,05$ ) du TPC, allant de 134.46 à 450.31 mg GAE/100g de MS pour les échantillons séchés à l'air chaud et 239.14 à 480.02 mg GAE/100g de MS pour les échantillons séchés par microonde assisté à l'air chaud.



**Figure 53:** Contenu des composés phénoliques totaux dans des tranches d'ail séchées et prétraités aux ultrasons aux différentes températures:

**SC:** Séchage à l'air chaud, **SMAC:** séchage par microonde assisté à l'air chaud.

L'application de l'ultrason avant les deux méthodes de séchage (SC et SMAC) a entraîné une augmentation de la teneur des composés phénoliques par rapport au séchage sans prétraitement. Ceci peut être causée par la réduction du temps de séchage des tranches de l'ail. Selon les données de la littérature, la durée plus courte du séchage assisté par ultrasons a réduit la dégradation des polyphénols (Kroehnke et al., 2018). Ceci est également confirmé par les recherches menées par Do Nascimento et al., (2016); lors du séchage des écorces de fruits ont enregistré un comportement

plus avantageux des composés phénoliques pour le séchage assisté par ultrasons par rapport au séchage sans traitement par ultrasons.

Ainsi, Les concentrations plus élevées des composés phénoliques dans les échantillons soniqués sont dues à la perturbation cellulaire favorisée par le traitement par ultrasons, qui permet la libération des composés intracellulaires. La réduction de l'activité enzymatique des oxydoréductases a également contribué à la préservation du TPC (**Fonteles et al., 2016**).

Il a été démontré dans l'étude de **Dehsheikh et al., (2019)**; qu'avec l'augmentation de la puissance ultrasonique, la teneur totale en phénols (TPC) des tranches de banane séchées a augmenté de manière significative de 113,7%. L'augmentation du TPC par prétraitement aux ultrasons a également été obtenue par **Ren et al., (2018)**; pour les oignons séchés à l'air chaud et lyophilisés et **Wang et al., (2019)**; pour le gombo séché par convection.

### 3.8. Activité antioxydante

Les capacités antioxydants des tranches d'ail séchées ont été évaluées par les méthodes DPPH. Les résultats sont illustrés sur la figure 54.

La capacité de récupération des radicaux DPPH des tranches de l'ail traités aux ultrasons était supérieure à celle des échantillons sans prétraitement aux ultrasons, bien que les différences dans ces échantillons soient statistiquement non significatives ( $p \geq 0,05$ ). Ce résultat peut s'expliquer par la raison que la réduction du temps de séchage après un prétraitement par ultrasons.

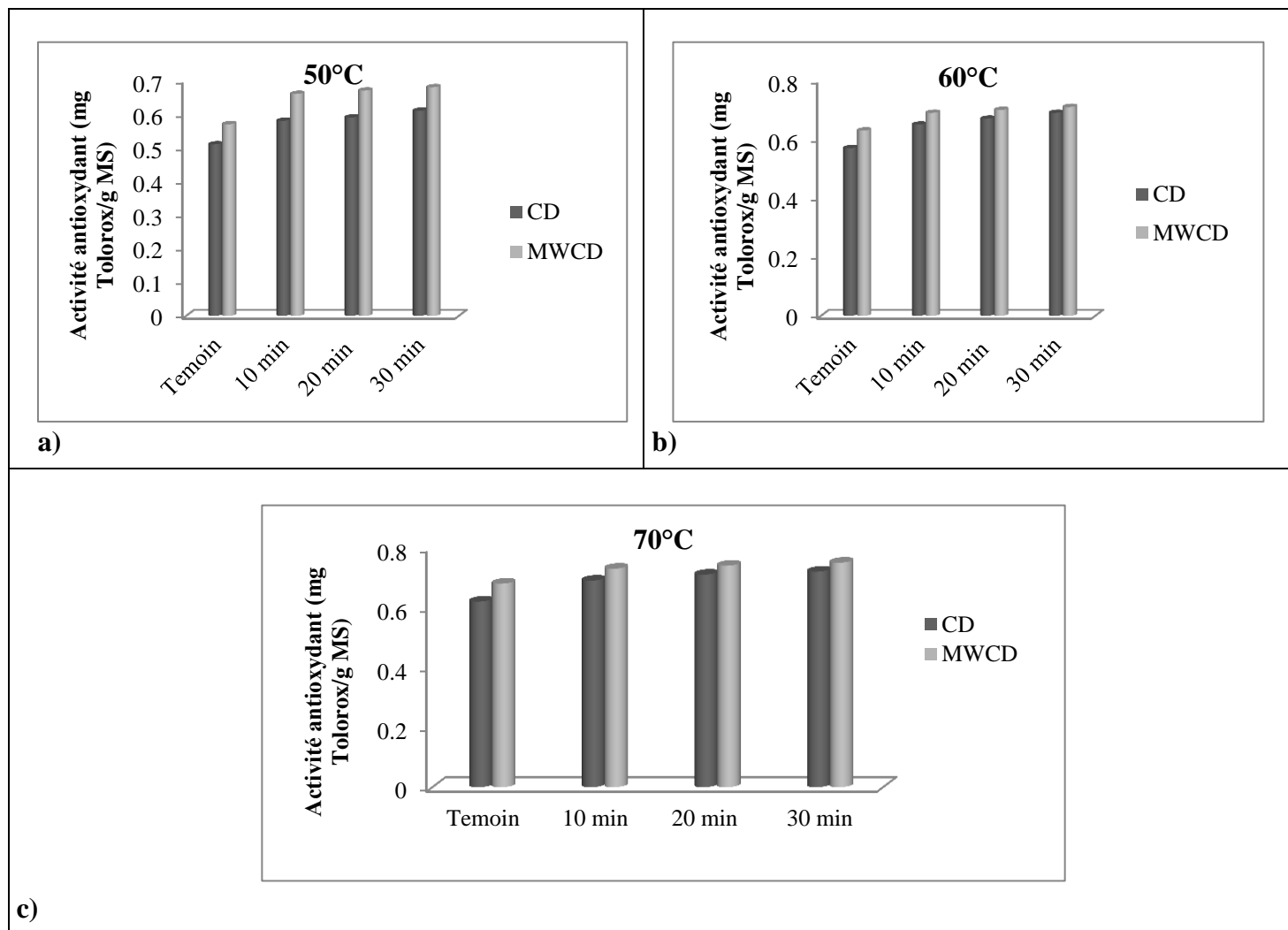
L'application d'ultrasons pendant le séchage a également affecté l'AC et son influence variait aux différentes températures du séchage. Dans la plupart des cas, temps de séchage plus court et température de séchage plus basse ( $\leq 60^\circ\text{C}$ ) peut préserver la capacité antioxydante et les composés phénoliques des tranches de l'ail. À ces températures, l'application d'ultrasons a réduit le temps de traitement, puis a limité les réactions d'oxydation, aidant à maintenir la capacité antioxydante.

Tandis que le séchage à des températures supérieures à  $70^\circ\text{C}$  peut entraîner une diminution des composés phénoliques et de l'activité antioxydant (**Rodríguez et al., 2014; Tao et al., 2016**).

Ces résultats est en accord avec les résultats de **Tao et al., (2018)**; qu'ils ont étudié les capacités antioxydants des tranches d'ail séchées à l'air chaud avec et sans sonication.

Ils ont trouvé que les valeurs étaient proches les unes des autres, bien qu'une différence statistiquement significative ait été trouvée entre certains échantillons. Généralement, le profil antioxydant de l'ail, y compris les phénoliques, subissait des changements dynamiques pendant le traitement thermique et le stockage (**Kim et al., 2013; Li et al., 2015**). Il était supposé que certains composés à haute capacité antioxydante pouvaient se former pendant le traitement à l'air chaud, entraînant ainsi une capacité antioxydante légèrement plus élevée des échantillons d'ail séchés à  $60^\circ\text{C}$ .





**Figure 54:** Capacité antioxydante des tranches d'ail séchées et prétraités aux ultrasons aux différentes températures: **SC**: Séchage à l'air chaud, **SMAC**: séchage par microonde assisté à l'air chaud.

D'autres études faites par **Kroehnke et al., (2015)**; il ont été montré que l'activité antioxydante des échantillons de carottes a été améliorée en raison de l'application d'ultrasons, à la fois pour les processus de séchage convectifs et micro-convectifs. **Halvorsen et al., (2006)**; ont signalé une augmentation de l'activité antioxydante de plusieurs légumes comme les carottes, les épinards, les champignons, les asperges, le brocoli et le chou après traitement thermique. **Dewanto et al., (2002)**; ont trouvé des résultats similaires dans les tomates traitées thermiquement par rapport aux témoins frais. Ces auteurs ont émis l'hypothèse que des activités antioxydantes plus élevées pourraient être liées à une augmentation de l'extractibilité des composants antioxydantes après le traitement thermique.

## **Conclusion**

L'ultrason a reçu beaucoup d'attention dans le domaine du séchage des aliments, en particulier pour les fruits et légumes. L'étude actuelle a démontré que l'application d'ultrason avant le séchage était une technologie efficace pour raccourcir le temps de séchage des tranches d'ail et minimiser la perte de qualité pendant le séchage.

Le taux de séchage était nettement plus élevé et le temps de séchage était plus court pour les tranches prétraités par ultrason pour les deux méthodes de séchage (SC et SMAC). L'application des ultrasons a induit une augmentation des coefficients de la diffusion effective, bien que cette augmentation soit plus notable à basses températures que celles plus élevées. Les modèles Two terme, Henderson et Pabis et Midilli et *al.* (2002) étaient les meilleurs pour décrire la cinétique de séchage.

Les propriétés physico-chimiques des tranches, y compris la teneur en polyphénols totaux, l'activité antioxydant, la couleur et la texture, étaient prédominantes pour les tranches de l'ail prétraités aux ultrasons par rapport à celles des tranches de l'ail non prétraités.

# **Partie Expérimentale**

## **Chapitre 6**

## Effet du CEP sur la conservation par froid de l'ail haché

### Résumé

Cette étude a été conçue pour étudier l'effet de champ électrique pulsé (CEP) et la durée de stockage sur la qualité de l'ail haché. Ces échantillons ont été conservés aux différentes températures (1, -7 et -18°C) pendant 6 mois. La qualité de l'ail haché a été évaluée par la perte de poids, pH, perte d'eau, le changement de couleur, les changements des capacités antioxydantes et la teneur en polyphénols totaux.

La congélation a également retardé les changements de couleur et amélioré les composés phénoliques totaux des échantillons. Comparé au stockage à 1°C, le taux de décomposition des échantillons stockés au -18°C était environ 4 à 8 fois plus faible pendant la durée de conservation jusqu'à la fin du stockage.

Ces résultats suggèrent que le stockage de congélation pourrait être considéré comme une méthode de conservation pour améliorer la qualité post-récolte et la capacité antioxydante des tranches de l'ail.

**Mots clé:** Ail Haché, Conservation à froid, Champ électrique pulsé, Sur-refroidissement.

### 1. Introduction

L'ail (*Allium sativum* L.) appartient aux légumes du genre *Allium*, il a une longue histoire en tant qu'aliment ayant un goût et une odeur uniques (Ariga et Seki, 2006; Ngo et al., 2007). De nos jours, l'ail a été non seulement largement utilisé dans les antibactériens, les antiviraux, les antifongiques et les antiprotozoaires, mais aussi dans les effets bénéfiques sur les systèmes cardiovasculaire et immunitaire (Fei et al., 2015). Les chercheurs ont prouvé qu'il y a plus de 200 composants identifiés à partir de l'ail, tels que les vitamines, les protéines, les lipides, les oligo-éléments, les flavonoïdes et au moins 33 composés organosulfurés différents (Ngo et al., 2007; Fei et al., 2015).

La gousse d'ail contient une quantité étonnamment grande d'alliinase (10 mg/g de poids frais), l'alliinase dans les cellules de la gaine du faisceau et l'alliine dans les cellules de stockage sont séparées, et seulement elles se rencontrent une fois que l'ail est endommagé, puis génèrent une réaction chimique et se convertissent s'allier immédiatement aux composés alk(en)yl sulfinylyle (Fei et al., 2015). La recherche scientifique moderne a révélé que la grande variété de fonctions alimentaires et médicinales de l'ail peut être attribuée aux composés soufrés de l'ail (Ariga et Seki, 2006).

Actuellement, la conservation à basse température est la méthode la plus couramment adoptée dans ce domaine (Ji et al., 2012). L'utilisation de la réfrigération (généralement entre 0 et 10°C) ou de la congélation (<-18°C) non seulement offre aux consommateurs une plus grande variété de produits, mais augmente également la disponibilité saisonnière.

Pendant, les fruits et légumes réfrigérés ont une durée de conservation plus courte que leurs homologues congelés. Ainsi, l'identification d'une température de réfrigération optimale est cruciale pour une conservation efficace des fruits et légumes (Liu et al., 2020). Une étroite zone de température sous zéro comprenant la température de la glace (entre 0°C et la température de congélation (FT)), le surrefroidissement (entre FT et la température de nucléation (NT)) sans

formation de cristaux) et le surrefroidissement (en dessous du FT avec congélation partielle) a été identifié comme ayant un potentiel pour la conservation des aliments frais (**Stonehouse et Evans, 2015; Sun et al., 2019**).

Le stockage des fruits et légumes dans une plage de températures inférieures à zéro (c'est-à-dire entre la température de la glace et la surrefroidissement) peut maintenir leurs cellules tissulaires dans un état vivant sans dommages de refroidissement post-récolte et destruction des structures cellulaires, garantissant la qualité des aliments (**Fukuma et al., 2012; Min et al., 2001**). De plus, ces basses températures minimisent la fréquence respiratoire et les réactions de détérioration dans les organismes, ainsi que la croissance de micro-organismes pathogènes.

En conséquence, un nombre croissant des travaux ont été consacrés à l'efficacité de la préservation et à l'amélioration des technologies qui exploitent cette plage de températures (**Elfalleh et al., 2015; Zhao et al., 2019**).

Cependant, au cours des dernières années, des technologies émergentes ont été proposées pour réduire les limitations liées à la congélation conventionnelle (**Velickova et al., 2013; Velickova et al., 2018**). En tant que nouvelle stratégie de congélation des fruits et légumes, l'application du CEP représente une alternative prometteuse (**Wiktor et al., 2012, Parniakov et al., 2015; Wiktor et al., 2015; Velickova et al., 2018**).

Cette dernière technologie dépend de l'électroporation (électroperméabilisation). Un phénomène qui se produit comme une perforation induite électriquement (application d'un champ électrique externe), réversible ou irréversible de la membrane cellulaire. Le caractère de l'électroporation dépend des paramètres de traitement et des caractéristiques du matériau traité (**Wiktor et al., 2015; Dellarosa et al., 2016; Tylewicz et al., 2017**).

L'électroporation irréversible détruit les cellules par des dommages permanents à la membrane. Elle est généralement utilisée dans les processus d'inactivation microbienne et pour augmenter le rendement d'extraction (**Velickova et al., 2018**).

Dans le processus réversible, le développement des pores de la membrane n'est pas aussi avancé et la membrane cellulaire peut être refermée. Une telle influence du CEP sur les systèmes biologiques est souvent surveillée par des changements de propriétés électriques (**Wiktor et al., 2015**). Généralement, les tranches d'ail sont stockées pendant des durées variables avant d'être consommées, il est donc important pour les industries de transformation de l'ail et les consommateurs de connaître les changements des constituants chimiques et des capacités antioxydantes pendant le stockage, mais jusqu'à présent, cela n'a pas encore été étudié. Dans la présente étude, les changements des capacités antioxydantes, des polyphénols totaux la couleur ont été déterminés dont le but est:

1. Evaluer l'effet de prétraitement par CEP
2. Evaluer l'effet de la température et la durée de stockage sur la qualité d'ail.

## 2. Matériels et méthodes

### 2.1. Matière végétale

L'ail (*Allium sativum* L., El-Hamra) a été récolté à Harrouche, un village de Skikda, province, à l'est de l'Algérie. Les bulbes d'ail ont été stockés dans un endroit sec à température ambiante (20°C) jusqu'à l'utilisation. Les bulbes ont été séparés en gousses, pelés puis tranchés en morceaux uniformes de 2 mm d'épaisseur et autres sont broyées sous formes hachées à l'aide d'un broyeur électrique (type SONACHI). La teneur en humidité des échantillons a été déterminée par séchage dans une étuve à vide (Binder DV53, Francfort, Allemagne) à 70°C pendant 24h selon la méthode de l'Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 2010). La teneur en humidité initiale des échantillons d'ail était de  $63 \pm 0,5\%$  (w/b).

### 2.2. Prétraitement par champs électriques pulsés (CEP)

Le traitement par champ électrique pulsé (CEP) a été effectué dans un système CEP discontinu (Laboratoire de recherche en technologie alimentaire et nutrition humaine, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie, El Harrach, Algérie). L'équipement a été appliqué à l'aide d'un générateur CEP qui produisait des impulsions de forme d'onde à décroissance exponentielle. Le prétraitement a été réalisé dans une chambre de traitement avec deux disques parallèles à électrodes inoxydables. Les échantillons ont ensuite été prétraités à une intensité CEP (1000V/cm et 30 impulsions). Les impulsions ont été contrôlées en ligne à l'aide d'un oscilloscope. La durée  $t_i$  des impulsions exponentielles était d'environ 450  $\mu$ s et la fréquence était de 10 Hz pour toutes les expériences. La température d'entrée de la chambre de traitement CEP était d'environ 20°C et l'augmentation de la température de sortie due au traitement CEP ne dépassait pas 3°C.

### 2.3. Conditions expérimentales de stockage et durée de conservation

Les échantillons ont été placés dans des paniers en plastique et emballés dans des sacs en polyéthylène. Tous les échantillons ont été stockés à 1, -7 et -18°C, respectivement. Les périodes contrôlées sont après 03 jours, une semaine, deux semaines, trois semaines, un mois, deux mois, 3 mois, 4 mois, 5 mois et 6 mois.

### 2.4. Détermination de pH

Le pH a été déterminé en utilisant la méthode décrite par ISO; 1842 (ISO, 1991). 10g de l'ail broyé a été homogénéisé avec l'eau distillée à un rapport de 1:10 (échantillon: eau). Ensuite, le pH a été mesuré en utilisant une électrode combinée (877 Titrino plus, analyses d'ions Metrohm CH9101, Herisau, Suisse) jusqu'à la stabilisation du pH. La mesure a été effectuée à température  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ . Les analyses ont été effectuées en cinq répétitions.

## 2.5. Détermination de couleur

La couleur des échantillons de l'ail a été mesurée à l'aide d'un chroma mètre portable CR-400 (Konica Minolta, Inc. Japon). Les valeurs  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  des échantillons ont été obtenues avec une grande précision. Ils ont été mesurés avant stockage et également à la fin de chaque période de stockage à 1°C, -7°C et -18°C.

$L^*$  indique la luminescence (légèreté),  $a^*$  signifie l'axe de couleur du vert au rouge, et  $b^*$  indique l'axe de couleur du bleu au jaune. Le changement de couleur total ( $\Delta E$ ) a été calculé comme suit:

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2}$$

## 2.6. Mesure des pertes d'eau

Les pertes des gouttes des échantillons congelés (20g) ont été évaluées après décongélation. Afin de mesurer les pertes de gouttes de l'ail haché. Les échantillons congelés ont été mettre dans une passoire. Cette dernière est placé directement sur un papier absorbant et la décongelée fait à température constante (20°C) pendant 2h. Les échantillons ont été pesés à un intervalle de 10min (**Dermesonlouoglou et al., 2016**).

Les pertes de gouttes ont été définis par la différence entre le poids à certains temps « t » et le poids initial « t<sub>0</sub> » de l'échantillon (**Talens et al., 2001; Liang et al., 2015**).

Ces pertes (PG) ont été calculées en utilisant la méthode suggérée par **Xin et al., (2014)**; en appliquant l'équation suivante :

$$PG(\%) = \frac{M_t - M_0}{M_i} \times 100 \quad (10)$$

$M_t$ : La masse de l'échantillon avant la décongélation (g)

$M_0$ : La masse du papier absorbant (g)

$M_i$ : La masse du papier absorbant plus le liquide égoutté (g)

## 2.7. Dosage des polyphénols

### 2.7.1. Extraction de polyphénols

La méthode décrite par ISO; 14502-1 est utilisée (**ISO, 2005**):

- Brièvement, 0,200 ± 0,001g de chaque échantillon a été pesé dans le tube, et 5ml de méthanol à 70% et à 70°C a été ajouté.
- L'ex-tube a été mélangé et chauffé à 70°C pendant 10 min.
- Après refroidissement à la température ambiante, l'extrait a été centrifugé à 7840 tours pendant 10 min (Centrifugeuse Sigma 4-5L, Allemagne).
- Le surnageant a été décanté dans une conique gradué.
- L'étape d'extraction a été répétée trois fois.

- Les deux extraits ont été rassemblées et le volume ajusté à 10ml avec 70% de méthanol froid.
- Un millilitre de l'extrait a été dilué avec de l'eau jusqu'à 5mL (eau d'ionisée).

### 2.7.2. Détermination des polyphénols totaux

- La teneur en polyphénols totaux (TPC) a été déterminée par spectro-photométrie (Shimadzu, UV 1800, Japan), en utilisant de l'acide gallique comme une norme, selon la méthode décrite par (ISO) 14502-1 (ISO, 2005).
- En bref; 1,0 ml de l'extrait de l'échantillon dilué a été ajouté au tube contenant 5,0 ml d'une dilution 1/10 du réactif de Folin-Ciocalteu dans l'eau.
- Ensuite, 4,0 ml d'une solution auto-bonate de sodium (carbonate de sodium) (7,5%, p/v) ont été ajoutés.
- Les tubes ont ensuite été laissés au repos à température ambiante pendant 60 min avant de l'absorbance à 765 nm a été mesuré par rapport à l'eau.

Toutes les valeurs sont exprimées en équivalents mg d'acide gallique (GAE) par 100g de matière sèche de l'échantillon de l'ail

## 2.8. Mesure d'activité antioxydante

### 2.8.1. Dosage de piégeage des radicaux DPPH

L'activité de piégeage des radicaux libres de l'échantillon de l'ail a été mesurée par l'intermédiaire du 1,1-diphényl-2-picryl-hydrazil (DPPH). Le dosage de piégeage des radicaux est utilisé selon la méthode de Blois (1958) avec quelques modifications.

- En bref, on a préparé une solution de 1 mmol de DPPH dans l'éthanol et 2ml de cette solution a ajouté à 2 ml de l'extrait d'échantillon d'ail aux différentes concentrations dans l'eau distillée.
- Les mélanges ont été agités vigoureusement et ont été ensuite laissé au repos à la température ambiante pendant 30 min.
- Leur absorbance a été mesurée à 517 nm en utilisant un spectrophotomètre (Shimadzu, UV 1800, Japan).
- La solution de DPPH qui ne contient pas un échantillon d'ail a été utilisé comme témoin (Bae et al., 2014).
- Le Trolox a été utilisé pour établir la courbe d'étalonnage et les résultats ont été exprimés en mg de Trolox par g matière sèche de l'échantillon de l'ail.



## 2.9. Analyses statistiques

L'analyse de la variance (ANOVA) a été effectuée en utilisant la procédure des modèles linéaires généraux (GLM) fournie dans la version logicielle 11.0 (2008) de SigmaPlot\SPW11. Les expériences ont été effectuées en triple et les moyennes des trois ensembles de données sont indiquées. Les moyennes étaient séparées par les différences les moins importantes selon les multiples plages de Duncan.

## 3. Résultats et discussion

### 3.1. Perte du poids

La perte du poids des fruits et des légumes a été attribuée à la température, la durée de stockage et au prétraitement avant la conservation.

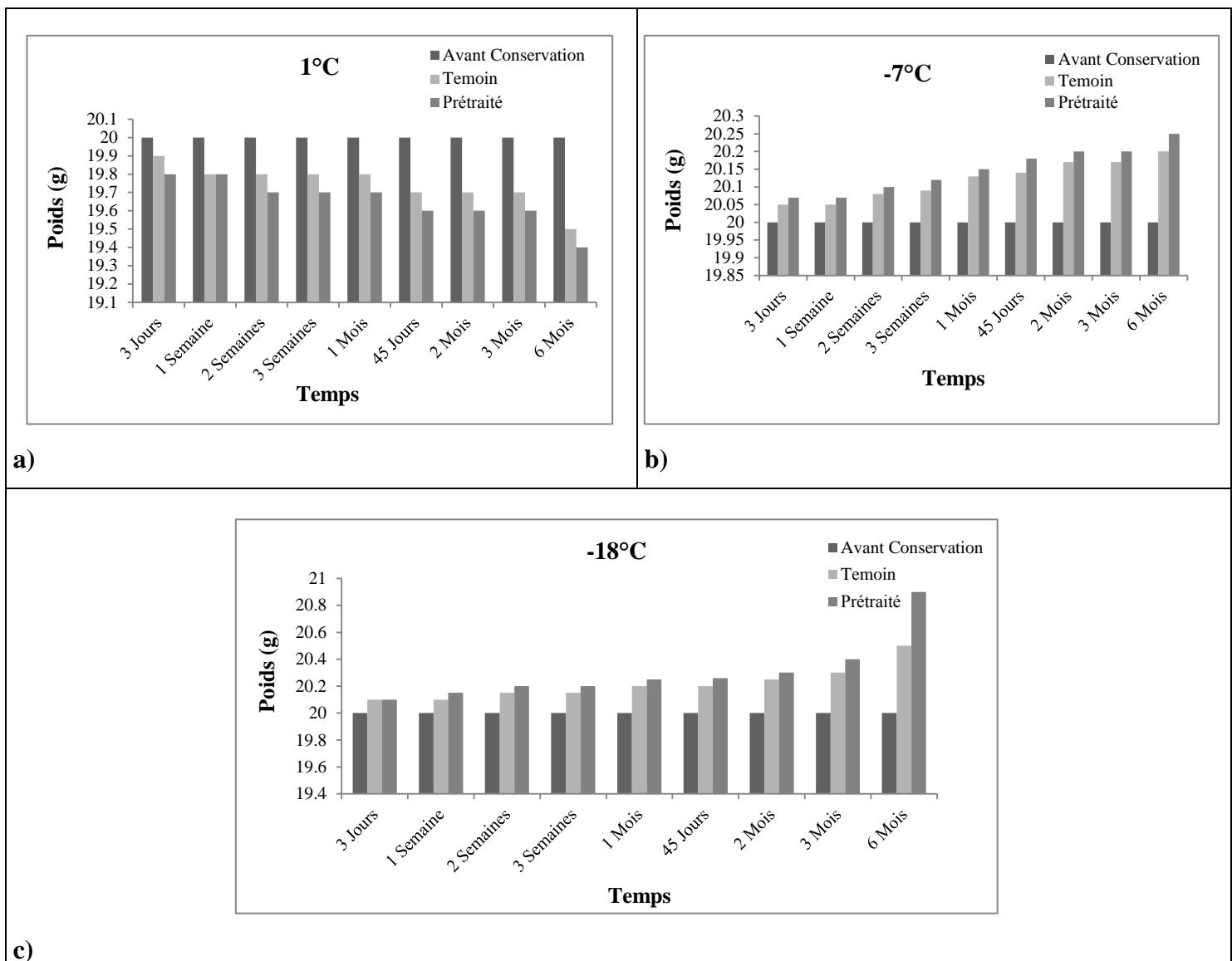
À partir de 3<sup>ème</sup> semaine, l'ail haché conservé à (1°C), une diminution du poids a été enregistré pour les deux types des échantillons (non traité et traité). Cette perte a été suivie jusqu'à la fin de stockage. Cela peut être expliqué par une perturbation de métabolisme du fait de passage de la température ambiante à la température de réfrigération. En remarquant que les pertes de poids sont plus importantes pour les échantillons traités avec CEP. **Espinoza et al., (2013)**; ont expliqués que cette différence pour les fruits et les légumes est due à l'électroporation par CEP qui provoque la précipitation des nutriments, donc il ya des pertes de qualité qui se produisent, caractérisées essentiellement par un flétrissement irréversible.

La perte du poids de l'ail haché est principalement due à la perte d'eau causée par les processus de transpiration et de respiration. Une autre expérience de stockage de trois semaines a montré que la perte de poids des laitues en feuilles super refroidies était réduite de 4 à 5% dans les conditions de réfrigération traditionnelles (sous 5°C)

Les effets principaux du temps et de température de stockage sur la perte de poids, ont indiqué que l'interaction était apparente.

Tandis que, dans le cas de congélation (-18°C). Il y a une augmentation progressive du poids dans les deux types des échantillons, cela peut être expliqué par la formation des cristaux lors de congélation. Ce phénomène est plus important pour l'ail haché traité, cela peut être expliqué par le phénomène de l'électroporation. Cependant, certaines études ont prouvé que le taux de congélation des fruits prétraités par CEP est plus rapide par rapport au non traités.

La Congélation et sur refroidissement de l'ail haché, prétraité par CEP et conservé à -7°C et -18°C; ont considérablement limité la perte de poids des échantillons par rapport à 1°C. En ce sens, la congélation et le traitement par CEP pourrait mieux maintenir le poids initial suivi par la sur-refroidissement pendant tout le stockage.



**Figure 55:** Evolution du poids de l'ail haché au cours de la conservation.

### 3.2. Evolution du pH

L'évolution du pH est montrée dans la figure 56. Pour les échantillons conservés à (1°C), les valeurs de pH de l'ail haché sans prétraitement oscille entre 6.7 et 6.3 alors que pour l'ail prétraité au CEP, les résultats enregistrés entre 6.5 et 6.1. Pour les échantillons conservés à (-7°C) et (-18°C), les valeurs de pH diminuent lentement par rapport à celle de réfrigération.

La conservation au froid 1°C) entraine une diminution de pH pour tous les échantillons (traités et non traités). Cette diminution de pH s'explique par l'oxydation des acides organiques.

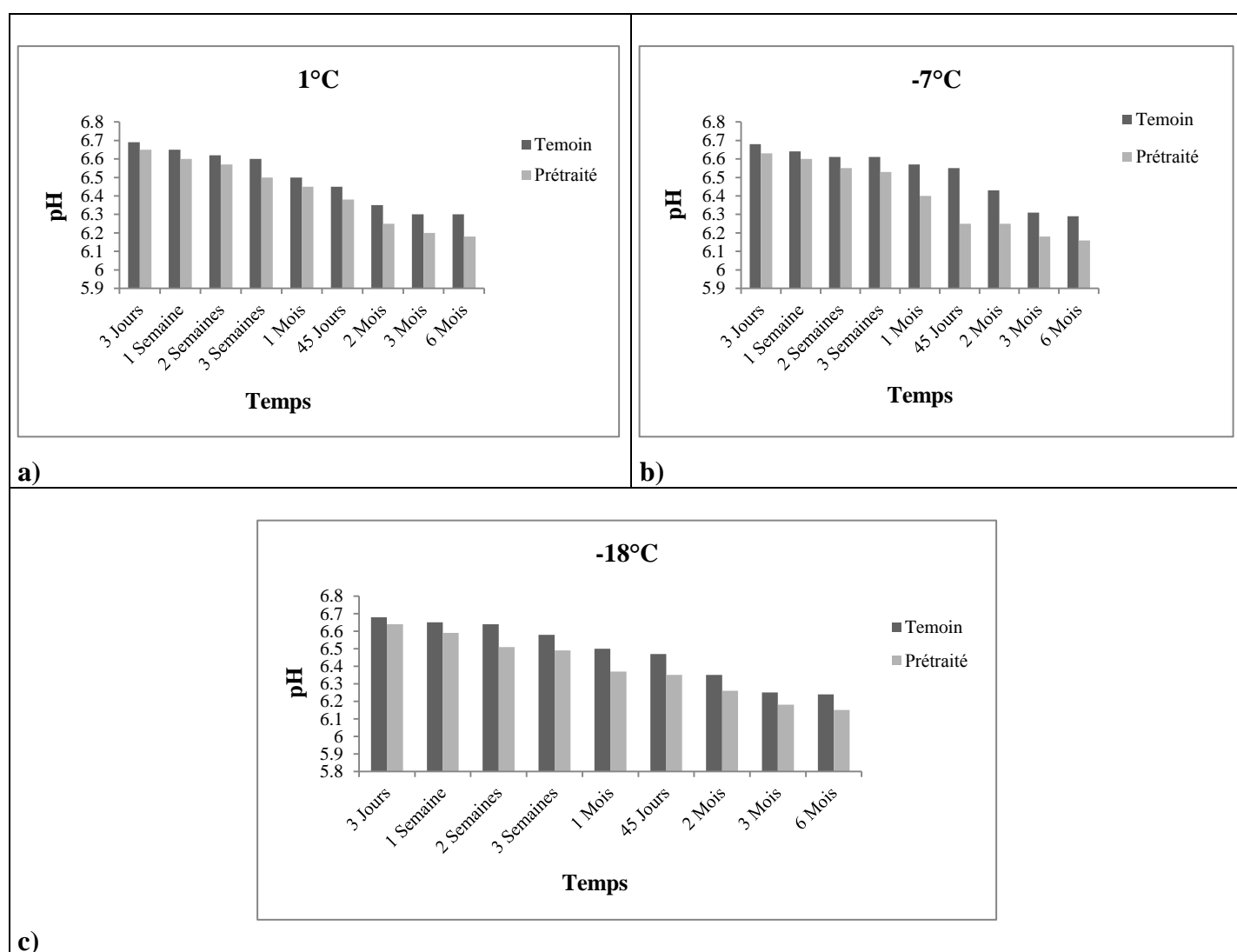
### 3.3. Mesure des pertes d'eau durant la congélation

La formation des cristaux de glace lors de la congélation à l'inconvénient d'entraîner souvent une détérioration mécanique de la texture des tissus. Le but de mesure des pertes d'eau est de déterminer la qualité de l'ail haché, plus il y a des pertes, plus il y a destruction des tissu cellulaire et par conséquence il y a des pertes plus importantes de la qualité.

La figure 57 montre les pertes en eau des échantillons de l'ail haché congelé à (-18°C). Les données obtenues à partir de cette analyse ont montré une perte d'eau plus faible pour l'ail haché non traitées par rapport aux l'ail haché traités.

Au cours du temps, il y a des pertes plus ou moins importantes, en remarquant que l'ail soumis à un traitement par CEP a eu la plus grande perte en eau. Cela peut être expliqué par l'effet de l'électroporation sur les cellules.

Une perte d'eau plus élevée dans le cas de de l'ail haché non traité peut être liée à l'augmentation de la taille moyenne des cristaux de glace dans l'échantillon. Il a été confirmé dans plusieurs études que la genèse de cristaux de glace plus gros conduisait à une perte de goutte plus élevée en raison d'une destruction plus élevée de la structure cellulaire résultant d'effets mécaniques, chimiques et de retrait (Bevilacqua *et al.*, 1979; Delgado et Sun, 2001; Sadot *et al.*, 2017).



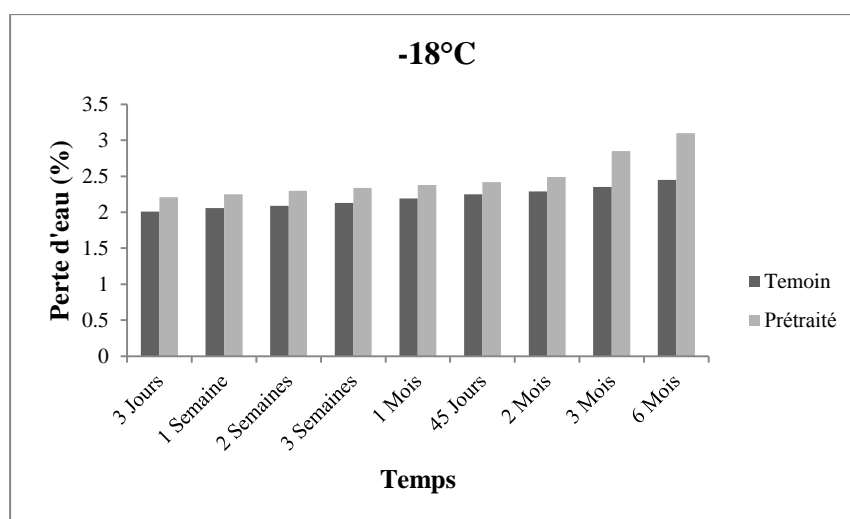
**Figure 56:** Evolution du pH de l'ail haché au cours de la conservation.

### 3.4. Changements de la couleur

La couleur est un indice de qualité majeur pour les légumes frais et transformés, car les consommateurs fondent initialement leur décision sur de beaux produits. Par conséquent, il est très important de mettre en œuvre la technique la moins invasive qui permettra la meilleure rétention de couleur (Velickova et al., 2018).

L'analyse de couleur de l'ail haché non traités et traités au CEP dans les différentes conditions expérimentales est rapportée dans la figure.

Le changement de couleur de l'ail haché conservé à 1°C a été observé après 15 jours pour les échantillons traités et une semaine pour les échantillons non traités. Tant que à -7°C, cette changement a été observés après 2 mois et 3 mois pour les échantillons non traités et traités respectivement. L'ail haché congelés à -18°C, le changement de couleur a été observé après 3 mois pour les échantillons non traités et au 6<sup>ème</sup> mois pour l'ail haché traités.



**Figure 57:** Changement des pertes en eau des d'ail haché congelés à (-18°C).

L'application d'un champ électrique a provoqué un assombrissement des échantillons. Tous les échantillons traités au CEP ont été caractérisés par des valeurs  $L^*$  inférieures au contrôle (71,18). De plus en comparaison avec des échantillons intacts, le  $b^*$  de l'ail haché traité au CEP, il était plus jaunes. Des même résultats ont été obtenus par Wiktor et al., (2020); pour les pomme. Tant que, (Velickova et al., 2018); ont trouvé que la luminosité des fraises n'a pas changé, alors que le jaunissement a augmenté.

L'impact du CEP sur la couleur peut avoir un double effet. D'un côté, il provoque la fuite de contenu intracellulaire et améliore l'activité de certaines enzymes, mais de l'autre côté, il inactive également certaines enzymes permettant une meilleure rétention de la couleur (Wiktor et al., 2015). D'autres chercheurs ont déclaré que le traitement par le CEP peut provoquer un léger effet de brunissement sur les pommes (Grimi et al., 2010).

Concernant la différence de couleur totale  $\Delta E$ , il a été observé que les échantillons traités au CEP avaient des valeurs  $\Delta E$  significativement plus élevées, par rapport à celle non traité. **Selon Tiwari et al., (2010)**; les valeurs de  $\Delta E$  supérieures à 2 indiquent qu'un tel changement de couleur pourrait être visible par un consommateur à l'œil nu.

Les changements de couleur de l'ail haché congelés-décongelés prétraités pourraient s'expliquer par le phénomène d'électroporation. L'application de CEP provoque la perforation de la membrane cellulaire et d'un système vacuole lié à la membrane (**Tekle et al., 2005**). De plus, la procédure de congélation-décongélation améliore en outre l'alternance de la structure interne des tissus après décongélation, en raison de la formation de cristaux de glace et de la désintégration de la membrane.

### 3.5. Changements des polyphénols totaux pendant le stockage

La teneur des polyphénols totaux de l'ail haché pendant le stockage aux différentes températures est indiqué sur la figure 58. Les résultats de l'analyse ont montré que la durée de stockage, la température et le traitement par CEP avaient un effet sur la teneur de polyphénols totaux. Après le traitement des échantillons par CEP, les polyphénols sont augmentés. Alors l'ail haché traité au CEP contenait des concentrations de composés phénoliques plus élevées que l'ail haché non traité.

Au début des semaines, aucune différence de teneur en polyphénols dans l'ail n'a été présentée pour tous les échantillons. Après quatre semaines la teneur a diminué de manière significative pour les échantillons non traités conservés à 1°C. **Fei et al., (2015)**; obtenus que la teneur en polyphénols de l'ail diminuent à partir de 6<sup>ème</sup> semaine (stockage à 20°C).

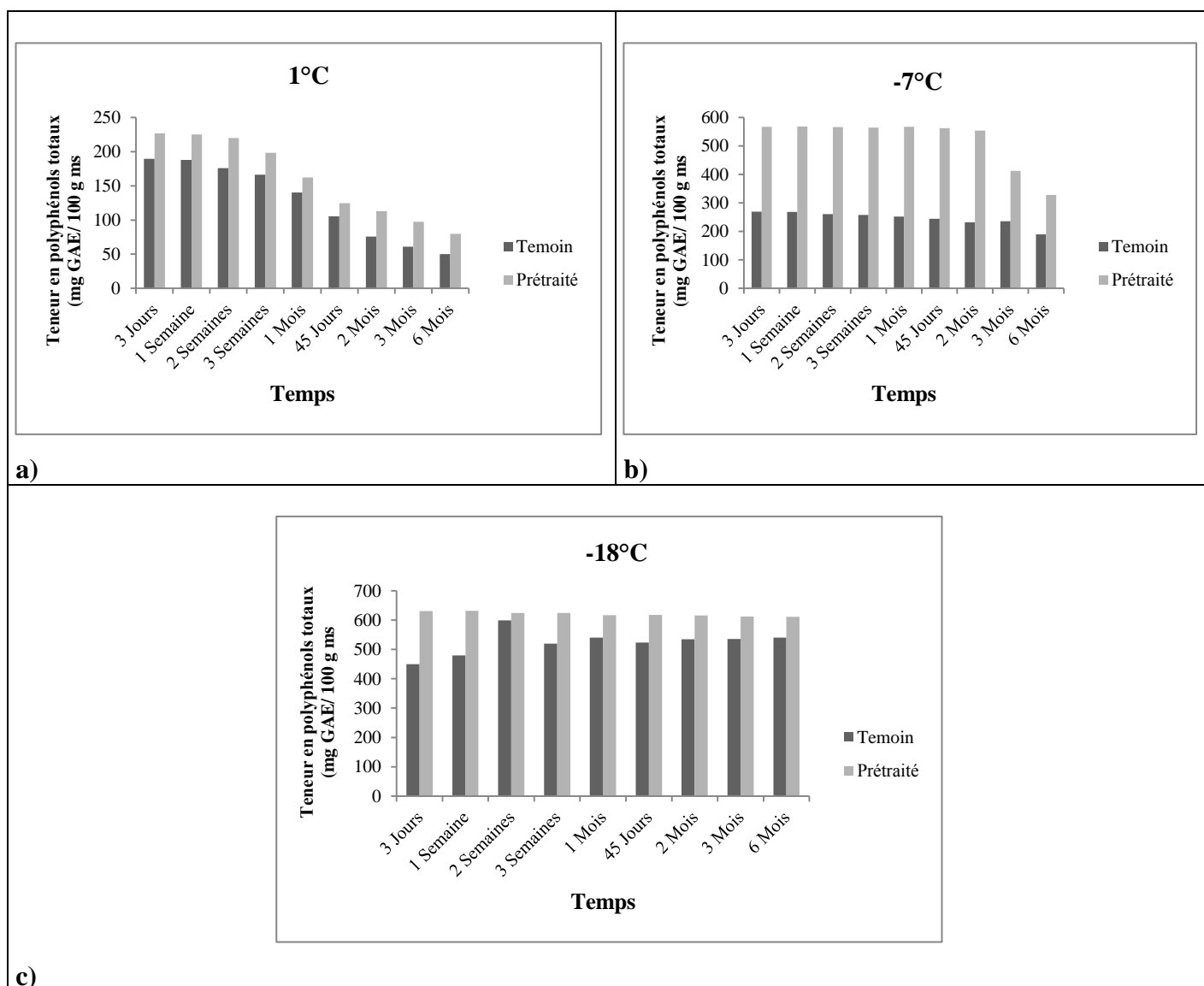
Pour les échantillons stockés à -7°C, le contenu de polyphénols totaux a diminué à partir 3<sup>ème</sup> mois pour l'ail haché non traité, puis a continué jusqu' à la fin de stockage. Tant que aucune changement a été observé pour les échantillons traités toute période de stockage. Nos résultats sont en accord avec les résultats (**Fan et al., 2018**). Qu'ils ont trouvé que les abricots à maturité faible et à maturité moyenne pouvaient être conservés pendant 90 jours par stockage NFT, tout en maintenant une meilleure qualité.

Lorsque les fruits et les légumes se stockent à NFT, le liquide non gelé dans les fruits et les légumes se refroidissent à basse température et se solidifient finalement en un état solide amorphe ou en état vitreux, dans lequel les taux de diffusion moléculaire sont considérablement supprimés (**Goff, 1992; Fan et al., 2018**). La formation de cet état stable supprime toutes les réactions chimiques qui nécessitent une diffusion moléculaire. Le mécanisme efficace d'évitement du gel conduit à une inactivité métabolique avec le fruit et légume et les rend ainsi stable pendant des périodes beaucoup plus longues (**Teixeira et al., 2013**). Certaines littératures ont également rapporté que le stockage au NFT de -0,5°C a remarquablement inhibé l'augmentation de l'activité polyphénoloxydase (**Jing et al., 2016**).

Récemment, cette température inférieure à zéro a fait l'objet d'une attention croissante de la part de la recherche dans le domaine de la conservation à basse température en raison de sa capacité supérieure à inhiber la fréquence respiratoire, les réactions de détérioration et la croissance de micro-organismes pathogènes sans causer de lésions de refroidissement et de détérioration de la qualité des aliments (Liu *et al.*, 2020).

Pour les échantillons stockés à  $-18^{\circ}\text{C}$ , le niveau de polyphénols totaux a augmenté pour tous les échantillons traités. Pour l'ail haché non traité reste stable jusqu'à 3<sup>ème</sup> mois. Tant que aucune changement a été observé pour les échantillons traités jusqu'à la fin de stockage.

L'augmentation du TPC de l'ail haché traité par rapport au non traité est un concept bien connu tel qu'observé dans notre étude en raison de la perturbation cellulaire causée par le CEP et la décongélation des échantillons avant l'analyse qui a amélioré l'extraction de ces composés (De Ancos *et al.*, 2000; Bulut *et al.*, 2018).



**Figure 58:** Evolution des polyphénols totaux au cours de la conservation par froid.

Les résultats obtenus sont également en accord avec les études de **González et al., (2003)**. Ils ont constaté que le TPC des mûres étaient stables pendant 3 mois de stockage congelé à -24° C.

**Fei et al., (2015)**; a déclaré que presque aucune information n'est disponible sur si et comment la durée de stockage affecte les changements des constituants chimiques et les capacités antioxydantes de l'ail. Dans la présente étude, nous avons constaté que la durée et la température stockage avaient une influence significative sur les changements de polyphénols totaux.

Généralement, la teneur en phénols des fruits et légumes est très variable et est fortement influencée par le stade de maturité, les zones de culture, la variété, les longueurs et les conditions de stockage et les techniques de transformation (**Morales-de la Pena et al., 2011**).

Néanmoins, d'autres travaux connexes ont indiqué qu'en général, la teneur en phénols peut augmenter, diminuer ou rester stable dans les fruits au cours du temps en fonction des conditions de stockage (**Kalt, 2005; Morales-de la Pena et al., 2011**).

### 3.6. Changements de la capacité antioxydante pendant le stockage

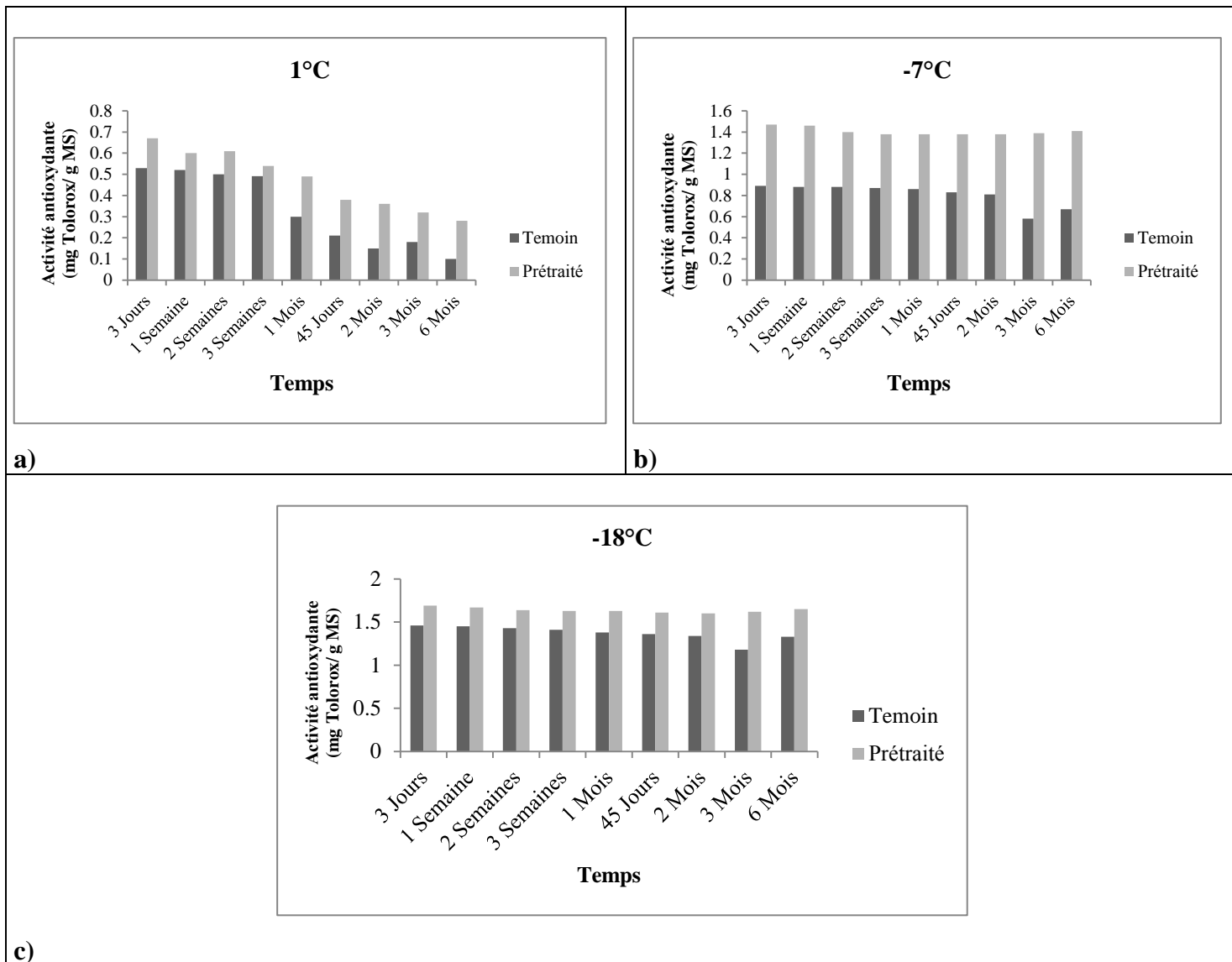
La capacité antioxydante de l'ail haché pendant le stockage aux différentes températures est indiquée sur la figure 59.

Au début des semaines, aucune différence de la capacité antioxydant dans l'ail n'a été présentée pour tous les échantillons. Après quatre semaines la capacité antioxydante a diminué de manière significative pour les échantillons non traités conservés à 1°C.

La capacité de piégeage radicalaire de l'ail haché stockées au NFT et FT était considérablement élevée que celle de l'ail haché stockées à 1°C. Ainsi, les capacités de récupération DPPH du groupe -18°C étaient légèrement supérieures à celles du groupe -7°C pendant toute la période de stockage.

Ces résultats montrent que le stockage NFT a amélioré le pouvoir réducteur. Le stockage du NFT et FT et le prétraitement par CEP améliorerait considérablement le potentiel antioxydante de l'ail haché. Ces observations sont en accord avec une étude précédente, qui rapportait qu'un stockage à basse température pourrait augmenter légèrement les valeurs d'activité antioxydante à la fin de la période de stockage chez les petits fruits (**Piljaczegarac et Samec, 2011**). La présente étude a montré que le stockage de NFT peut efficacement maintenir la qualité et améliorer le potentiel antioxydante de l'ail haché.

Ainsi, cette augmentation pourrait être justifiée par la libération de molécules ayant une activité antioxydant provoqué par le traitement par CEP.



**Figure 59:** Evolution d'activité antioxydante au cours de la conservation par froid.

### Conclusion

Les températures inférieures à zéro, la température de la glace, le sur-refroidissement et la congélation, sont des méthodes très prometteuses pour la conservation de la qualité et prolonger de la durée de conservation des fruits et légumes.

La conservation NFT peut prolonger efficacement le stockage, retarder les changements de couleur. Les échantillons de l'ail stockés à  $-7^{\circ}\text{C}$ , par rapport aux échantillons de l'ail stockés à  $1^{\circ}\text{C}$ , les paramètres de la qualité, y compris la couleur, la teneur en composés phénoliques totaux, ont été maintenus à des niveaux plus élevés. De plus, nos recherches ont également indiqué que La conservation NFT améliore la capacité antioxydante totale pendant le stockage.

La conservation NFT peut être une stratégie prometteuse pour améliorer la qualité post-récolte, et fournir une perspective particulière pour une analyse biologique plus approfondie.



Ainsi, la congélation à  $-18^{\circ}\text{C}$  pourrait être considérée comme le meilleur choix parmi les conditions de conservation à froid.

L'ail prétraitées au CEP ont permis une viabilité cellulaire plus élevée et une rétention de la couleur. L'application du CEP favorise une perte de la qualité de l'ail en termes de perte d'eau par rapport aux échantillons non traités.

Ces travaux ont confirmé que la conservation de la structure est essentielle au maintien des autres paramètres de qualité légumes après congélation.

# **Conclusion Générale**

Ce travail de thèse a consisté à l'étude de l'effet du prétraitement sur la conservation de l'ail. L'approche adoptée consiste à:

- Déterminer l'impact des prétraitements sur le séchage (séchage à l'air chaud et séchage à microonde assisté à l'air chaud) et conservation par froid (réfrigération, surfusion et congélation)
- Déterminer la qualité du Produit fini en termes de valeur nutritionnelle (pertes en phénols totaux et activité antioxydant), de qualité organoleptique (couleur, texture).

Une comparaison entre les effets des prétraitements sur les différentes méthodes du séchage et sur les caractéristiques des tranches de l'ail; le CEP et l'US se sont révélés efficaces sur la qualité et le taux de séchage. En raison de la dégradation des cellules et de l'augmentation du transfert de masse et de la diffusivité, le temps du séchage a été diminué dans les échantillons prétraités par rapport aux échantillons non prétraités. L'application d'ultrason a été efficace sur l'amélioration de la qualité des tranches de l'ail tel que la teneur en polyphénols et les valeurs de couleur.

Les conditions optimisées pour le séchage à micro-ondes assisté à l'air chaud et le séchage à l'air chaud étaient les suivantes:

- Une température de 60 ° C pour réduire la teneur en humidité des échantillons à environ 12%.
- Les tranches de l'ail prétraité par ultrason et séché à microonde assisté à l'air chaud ont montré une couleur, une texture, une rétention des nutriments améliorés et une acceptabilité globale.

Ces résultats suggèrent que le séchage prétraité aux ultrasons peut être utilisé pour le traitement et la conservation de produits de haute qualité avec des économies d'énergie et de temps. Néanmoins, des études supplémentaires sont nécessaires pour optimiser les meilleures conditions de conservation des tranches de l'ail, tels que le matériau d'emballage et l'environnement de stockage.

D'une autre part, plusieurs paramètres de conservation par froids ont été étudiés, nous permettent de retenir les conditions suivantes:

- Une congélation pendant 6 mois, une surfusion -7°C et un prétraitement par CEP afin de réduire la dégradation de la qualité nutritionnelle de l'ail pendant l'entreposage.

L'étude de la qualité nutritionnelle de l'ail après CEP et conservation par froid révèle des pertes significatives en activité antioxydant, composés phénoliques qui laissent néanmoins au produit

## *Conclusion générale*

---

des valeurs nutritionnelles intéressantes, et proches de celles d'autres n'ayant subi aucun traitement.

Cette recherche doctorale a conduit à plusieurs développements méthodologiques adaptés aux caractéristiques des tranches de l'ail, en ce qui concerne en particulier l'application de prétraitement de CEP et l'ultrason sur les tranches de l'ail.

Notons enfin qu'au-delà des conclusions qui viennent d'être tirées, ce travail montre des caractéristiques du produit fini qui semblent pouvoir justifier de nouvelles voies de transformation et d'exploitation de l'ail.

**Références**

**Bibliographiques**

### Références Bibliographies

- Abano E. E., Ma H., Qu W. & Teye E. (2011).** Modeling pre-treatments effect on drying kinetics of garlic (*Allium sativum* L.) slices in a convective hot air dryer. *African Journal of Food Science*, 5(7), 425 – 435.
- Abraão, A. S., Lemos A. M., Vilela A., Sousa J. M. & Nunes F. M. (2013).** Influence of osmotic dehydration process parameters on the quality of candied pumpkins, *Food and Bioproducts Processing*, 91, 481-494.
- Adamrounou L. T., Conway J. & Castaigne F. (1994).** Influence de la déshydratation partielle par osmose sur la composition de tranche de pomme. *Sci.Aliments* (14), 75-85.
- Adedeji A. A., Gachovska T. K., Ngadi M. O. & Raghavan G. S. V. (2008).** Effect of Pretreatments on Drying Characteristics of Okra. *Drying Technology*, 26:10, 1251-1256.
- Ade-Omowaye BIO, Rastogi N.K., Angersbach A. & Knorr D. (2001).** Effects of high hydrostatic pressure or pre-treatment of high intensity electric field pulses on the dehydration characteristics of red paprika. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2, 1-7.
- Ade-Omowaye B. I. O, Taiwo K. A., Eshtiaghi N. M., Angersbach A. & Knorr D. (2003).** Comparative evaluation of the effects of pulsed electric field and freezing on cell membrane permeabilisation and mass transfer during dehydration of red bell peppers. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 4, 177-188.
- Afolabi I.S. (2014).** Moisture migration and bulk nutrients interaction in a drying food systems: a review. *Food Nutr. Sci.* 5, 692-714.
- Aguilar-Rosas S.F., Ballinas-Casarrubias M., Nevarez-Moorillon G.V., Martin-Belloso O. & Ortega- Rivas E. (2007).** Thermal and pulsed electric fields pasteurization of apple juice: effects on physicochemical properties and flavour compounds. *J. Food Eng.*, 83, 41–46.
- Alam M.R., Lyng J.G., Frontuto D., Marra F. & Cinquanta L. (2018).** Effect of pulsed electric field pretreatment on drying kinetics, color and texture of parsnip and carrot. *Journal of Food Science*, 83, 2159-2166.
- Al-Harashseh, M., Al-Muhtaseb A. a. H. & Magee T. R. A. (2009).** Microwave drying kinetics of tomato pomace: Effect of osmotic dehydration, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 48, 524-531.
- Alibas I. (2007).** Microwave, air and combined microwave-air-drying parameters of pumpkin slices. *LWT-Food Sci. Technol.* 40, 1445-1451.
- Altuntas J., Evrendilek G.A., Sangun M.K. & Zhang H.Q. (2010).** Effects of pulsed electric field processing on the quality and microbial inactivation of sour cherry juice. *Int. J. Food Sci. Technol.* 45, 899-905.

## References Bibliographies

---

- Amami E., Fersi A., Vorobiev E. & Kechaou N. (2007).** Osmotic dehydration of carrot tissue enhanced by pulsed electric field, salt and centrifugal force. *Journal of Food Engineering*, 83, 605-613.
- Amami E., Khezami L., Vorobiev E. & Kechaou N. (2008).** Effect of pulsed electric field and osmotic dehydration pretreatment on the convective drying of carrot tissue. *Drying Technol.* 26, 231-238.
- Amami, E., Khezami W., Mezrigui S., Badwaik L. S., Bejar A. K., Perez C. T. & Kechaou N., (2017).** Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on the convective drying of strawberry, *Ultrason Sonochem*, 36, 286-300.
- Amiali M., Ngadi M.O., Smith J.P. & Raghavan G.S.V. (2007).** Synergistic effect of temperature and pulsed electric field on inactivation of Escherichia coli O157:H7 and Salmonella enteritidis in liquid egg yolk. *Journal of Food Engineering*, 79, 689-694.
- AOAC (2000).** Official methods of analysis. 17<sup>th</sup> edition. Association of official in protein foods. Academic press. New York, 107.
- AOAC. (2010).** Official methods of analysis (18th ed.). Gaithersburg, MD: AOAC
- Aral S. & Beşe A.V. (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.
- Araya-Farias M. & Ratti C. (2009).** Food dehydration: general concepts. D. Sun , C. Ratti (éd.), *Advances in Food Dehydratation* , CRC Press LLC , Boca Raton, Floride , 1-32.
- Araya-Farias, M., Macaigne O. & Ratti C. (2014).** On the Development of Osmotically Dehydrated Seabuckthorn Fruits: Pretreatments, Osmotic Dehydration, Postdrying Techniques, and Nutritional Quality, *Drying Technology*, 32, 813-819.
- Arevalo P., Ngadi M. O., Bazhal M. I. & Raghavan G. S. V. (2004).** Impact of Pulsed Electric Fields on the Dehydration and Physical Properties of Apple and Potato Slices. *Drying Technology*, 22, 1233-1246.
- Ariga T. & Seki T. (2006).** Antithrombotic and anticancer effects of garlic-derived sulfur compounds: a review. *Biofactors* 26 (2), 93-103.
- Arshad R. N., Abdul-Malek Z., Munir A., Buntat Z., Ahmad M. H., Jusoh Y. M. M., Bekhit A. E.-D., Roobab U., Manzoor M. F. & Aadil R. M. (2020).** Electrical systems for pulsed electric field applications in the food industry: An engineering perspective. *Trends in Food Science & Technology*, 104, 1-13.
- Asavasanti S., Ersus S., Ristenpart W., Stroeve P., & Barrett D. M. (2010).** Critical electric field strengths of onion tissues treated by pulsed electric fields. *Journal of Food Science*, 75(7), 433-443.

## References Bibliographies

---

- Azoubel P.M., Baima M.d.A.M., Amorim M.d.R. & Oliveira S.S.B. (2010).** Effect of ultrasound on banana cv Pacovan drying kinetics, *J. Food Eng.* 97, 194–198.
- Azoubel, P. M. & Elizabeth Xidieh Murr F. (2004).** Mass transfer kinetics of osmotic dehydration of cherry tomato, *Journal of Food Engineering*, 61, 291-295.
- Babu, A. K., G. Kumaresan, V. A. A. Raj & R. Velraj (2018).** Review of leaf drying: Mechanism and influencing parameters, drying methods, nutrient preservation, and mathematical models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 536-556.
- Bae S. E., Cho S. Y., Won Y. D., Lee S. H. & Park H. J. (2014).** Changes in S-allyl cysteine contents and physicochemical properties of black garlic during heat treatment. *LWT - Food Science and Technology*, 55, 397-402.
- Bai Q., Chai M., Gu Z., Cao X., Li Y. & Liu K. (2009).** Effects of components in culture medium on glutamate decarboxylase activity and c-aminobutyric acid accumulation in foxtail millet (*Setaria italica* L.) during germination, *Food Chem.* 116, 152–157.
- Baier A.K., Bubler S. & Knorr D. (2015).** Potential of high isostatic pressure and pulsed electric fields to improve mass transport in pea tissue. *Food Research International*, 76, 66-73.
- Barba F.J., Parniakov O., Pereira S.A., Wiktor A., Grimi N., Boussetta N., Saraiva J., Raso J., Martin-Belloso O., Witrowa-Rajchert D., Lebovka N. & Vorobiev E. (2015).** Current applications and new opportunities for the use of pulsed electric fields in science and the food industry. *Food Res. Int.* , 77, 773-798.
- Barbosa-Canovas.G.V.,Gongora Nieto.M.M., Pathakamur Y.U.R. & Swanson.B.G. (1999).** Preservation of foods with pulsed electric fields, *Academic press*, London, 200.
- Barrera C. N., BRTORET P., CORELL P. & FITO (2009).** Effet de la déshydratation osmotique sur la stabilisation des tranches de pomme enrichis en calcium (var Granny Smith.): Influence des variables d'exploitation sur la cinétique des processus et des changements de composition. *Journal of Food Engineering*(92), 416-424.
- Baruchin A. M., Sagi A., Yoffe, B. & Ronen M. (2001).** Garlic burns. *Burns*, 27, 781–782.
- Bayan L., Koulivand P. H. & Gorji A. (2014).** Garlic: A review of potential therapeutic effects. *Avicenna Journal of Phytomedicine*, 4(1), 1-14.
- Baysal T., Icier F., Ersus S. & Yildiz H. (2003).** Effects of microwave and infrared drying on the quality of carrot and garlic. *Eur. Food Res. Technol.* 218, 68-73.
- Bazhal M. I., Ngadi M. O. & Raghavan V. G. S. (2003).** Influence of Pulsed Electropulsolysis on the Porous Structure of Apple Tissue. *Biosystems Engineering*, 86, 51-57.
- Bchir B., Besbes S., Attia H. & Blecker C. (2009).**Osmotic dehydration of pomegranate seeds: mass transfer kinetics and DSC characterization. *Int. J. Food Sci. Technol.*,44, 2208-2217.



## References Bibliographies

---

- Beato V. M., Orgaz F., Mansilla F. & Montañó A. (2011).** Changes in phenolic compounds in garlic (*Allium sativum* L.) owing to the cultivar and location of growth. *Plant Foods for Human Nutrition*, 66 (3), 218-223.
- BECHAA Besma, ZITOUNI Bariza, BRIKI Samia, Raghavan Vijaia G. S & AMIALI Malek (2019).** Osmotic dehydration facilitates subsequent drying of sliced Garlic. *Annals. Food Science and Technology*.
- Behera G. & 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 and Technology*, 75, 206-230.
- Ben Ammar J., Lanoisellé J. L., Lebovka N. I., Van Hecke E. & Vorobiev E. (2010).** Effect of a Pulsed Electric Field and Osmotic Treatment on Freezing of Potato Tissue. *Food Biophysics*, 5, 247-254.
- Benzie I.F.F. & Strain J.J. (1996).** The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of antioxidant power: the FRAP assay, *Anal. Biochem.* 239, 70–76.
- Bevilacqua A., Zaritzky N. E. & Calvelo A. (1979).** Histological measurements of ice in frozen beef. *Journal of Food Technology*, 14, 237-251.
- Bhargavaa N., Rahul S. M., Kshitiz K. & Vijay S. S. (2021).** Advances in application of ultrasound in food processing: A review. *Ultrasonics – Sonochemistry*, 70, 1-12.
- Bonatsou, S., Iliopoulos V., Mallouchos A., Gogou E., Oikonomopoulou V., Krokida M., Taoukis P. & Panagou E. Z. (2017).** Effect of osmotic dehydration of olives as pre-fermentation treatment and partial substitution of sodium chloride by monosodium glutamate in the fermentation profile of Kalamata natural black olives, *Food Microbiol*, 63, 72- 83.
- Bonazzi C. & Dumoulin E. (2011).** Quality Changes in Food Materials. *Drying Processes*, 35.
- Bot F., Verkerk R., Mastwijk H., Anese M., Fogliano V. & Capuano E. (2018).** The effect of pulsed electric fields on carotenoids bioaccessibility: The role of tomato matrix. *Food Chem*, 240, 415-421.
- Boukouvalas C. J., Bisharat G. I. & Krokida M. K (2010).** Structural Properties of Vegetables During Air Drying. *International Journal of Food Properties*, 13, 1393-1404.
- Bozkir H., Rayman Ergun A., Serdar E., Metin G. & Baysal T. (2019).** Influence of ultrasound and osmotic dehydration pretreatments on drying and quality properties of persimmon fruit. *Ultrason Sonochem*, 54, 135-141.
- Briki S., Zitouni B., Bechaa B. & Amiali M. (2019).** Comparison of convective and infrared heating as means of drying pomegranate arils (*Punica granatum* L.). *Heat and Mass Transfer*.
- Bruce D.M. (1985).** Exposed layer barley drying, three models fitted to new data up to 150 °C. *J Agric Engr Res*, 32, 337–47.

## References Bibliographies

---

- Bulut M., Bayer Ö., Kırtıl E. & Bayındırlı A. (2018).** Effect of freezing rate and storage on the texture and quality parameters of strawberry and green bean frozen in home type freezer. *International Journal of Refrigeration*, 88, 360-369.
- Çakmak R. Ş., Tekeoğlu O., Bozkır H., Ergün A. R. & Baysal T. (2016).** Effects of electrical and sonication pretreatments on the drying rate and quality of mushrooms. *LWT - Food Science and Technology*, 69, 197-202.
- Calín-Sánchez, Á., A. Figiel F., Hernández, P. Melgarejo, K. Lech & 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 A., Figiel A., Wojdyło A., Szarycz M. and Carbonell-Barrachina A.A. (2014).** Drying of garlic slices using convective predrying and vacuum-microwave finishing drying: kinetics, energy consumption, and quality studies. *Food Bioprocess Technol.* 7, 398–408.
- Caminiti I.M., Noci F., Muñoz A., Whyte P., Morgan D.J., Cronin D.A. v& Lyng J.G., (2011a).** Impact of selected combinations of non-thermal processing technologies on the quality of an apple and cranberry juice blend. *Food Chem.* 124 (4), 1387– 1392.
- Caminiti I.M., Palgan I., Noci F., Muanoz A., Whyte P., Cronin D.A., Morgan D.J. & Lyng J.G. (2011b).** The effect of pulsed electric fields (PEF) in combination with high intensity light pulses (HILP) on *Escherichia coli* inactivation and quality attributes in apple juice. *Innovative Food Sci. Emerging Technol.* 12, 118-123.
- Cano-Lamadrid, M., Lech K., Michalska A., Wasilewska M., Figiel A., Wojdyło A. & 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.
- Cárcel J. A., García-Pérez J. V., Riera E. & Mulet, A. (2007).** Influence of High-Intensity Ultrasound on Drying Kinetics of Persimmon. *Drying Technology*, 25(1), 185-193.
- Cárcel J. A., García-Pérez J. V., Benedito J., & Mulet A. (2012).** Food process innovation through new technologies: use of ultrasound. *Journal of Food Engineering*, 110(2), 200-207.
- Castro A. J., Barbosa-Canovas G. V. & Swanson B. G. (1993).** "Microbial inactivation of foods by pulsed electric fields". *J. food processing preservation* 17: 47-73.
- Castro A. M., Mayorga E. Y. & Moreno F. L. (2018).** Mathematical modelling of convective drying of fruits: A review. *Journal of Food Engineering*, 223, 152-167.
- Cavalcanti V. P., Aazza S., Bertolucci S. K. V., Pereira M. M. A., Cavalcanti P. P., Buttrós V. H. T., e Silva A. M. d. O., Pasqual M. & Dória J. (2020).** Plant, pathogen and biocontrol agent interaction effects on bioactive compounds and antioxidant activity in garlic. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 112, 1-9.

## References Bibliographies

---

- Chaguri, L., Sanchez M. S., Flammia V. P. & Tadini C. C. (2016).** Green Banana (*Musa cavendishii*) Osmotic Dehydration by Non-Caloric Solutions: Modeling, Physical-Chemical Properties, Color, and Texture, *Food and Bioprocess Technology*, 10, 615-629.
- Chandra S. & Kumari D. (2015).** Recent development in osmotic dehydration of fruit and vegetables: a review. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 55, 552-561.
- Charoux C. M. G., Ojha K. S., O'Donnell C. P., Cardoni A. & Tiwari B. K. (2017).** Applications of airborne ultrasonic technology in the food industry. *Journal of Food Engineering*, 208, 28–36.
- Chen N. N, Chen M. Q., Fu B. A. & Song J. J. (2017).** Far-infrared irradiation drying behavior of typical biomass briquettes. *Energy*, 121, 726-738.
- Chen Q., Li Z., Bi J., Zhou L., Yi J. & Wu X. (2017).** Effect of hybrid drying methods on physicochemical, nutritional and antioxidant properties of dried black mulberry, *Lwt*, 80, 178-184.
- Chen S. , Shen X., Cheng S. , Li P., Du J. , Chang Y. & Meng H. (2013).** Evaluation of garlic cultivars for polyphenolic content and antioxidant properties. *PLoS One*, 8 (11).
- Chen Y.-C., Kao T.-H., Tseng C.-Y., Chang W.-T. & Hsu C.-L. (2014).** Methanolic extract of black garlic ameliorates diet-induced obesity via regulating adipogenesis, adipokine biosynthesis, and lipolysis. *Journal of Functional Foods*, 9, 98-108.
- Chen Y., Li M., Dharmasiri T. S. K, Song X., Liu F. & Wang X. (2020).** Novel ultrasonic-assisted vacuum drying technique for dehydrating garlic slices and predicting the quality properties by low field nuclear magnetic resonance. *Food Chem*, 306.
- Chen Z. G., Guo X. Y. & Wu T. (2016).** A novel dehydration technique for carrot slices implementing ultrasound and vacuum drying methods. *Ultrason Sonochem*, 30, 28-34.
- Cheng Y. C., Chang M. H., Tsai C. C., Chen T. S., Fan C. C., Lin C. C., Lai C. H., Tsai F. J., Lin J. A. & Huang C. Y. (2013).** Garlic oil attenuates the cardiac apoptosis in hamster-fed with hypercholesterol diet. *Food Chem*, 136, 1296-302.
- Cheng X., Zhang M., Xu B., Adhikari B. & Sun J. (2015).** The Principles of Ultrasound and Its Application in Food Freezing Processes: A Review. *Ultrason. Sonochem*, 27, 576-585.
- Clark P. (2006).** Pulsed electric field processing. *Food Technology*, 60(1), 66-67.
- Colin L. (2016).** L'ail et son intérêt en phytothérapie. Université de Lorraine. Thèse de Doctorat.129.
- Condori M., Echazu R. & Sarvia L. (2001).** Solar drying of sweet pepper and garlic using the tunnel greenhouse drier. *Renew. Energy*, 22, 447-460.
- Condurso C., Cincotta F., Tripodi G., Merlino M. & Verzera A. (2019).** Influence of drying technologies on the aroma of Sicilian red garlic. *Lwt*, 104, 180-185.
- Contreras C., Martín-Esparza M.E., Chiralt A. & Martínez-Navarrete N. (2008).** Influence of microwave application on convective drying: effects on drying kinetics, and optical and mechanical properties of apple and strawberry, *J. Food Eng.* 88 (1), 55–64.

## References Bibliographies

---

- Corrêa J., Pereira L., Vieira G. & Hubinger M. (2010).** Mass transfer kinetics of pulsed vacuum osmotic dehydration of guavas. *J. Food Process Eng.*, 96, 498-504.
- Cserhalmi Z.C., Sass-Kiss A., Toth-Marks M. & Lechner N. (2006).** Study of pulsed electric field treated citrus juices. *Innov. Food Sci Emerg. Technol.*, 7, 49-54.
- Cui Z., Xu S. & Sun D. (2003).** Dehydration of garlic slices by combined microwave-vacuum and air drying. *Dry. Technol.* 21, 1173–1184.
- da Costa Ribeiro, A. S., Aguiar-Oliveira E. & Maldonado R. R. (2016).** Optimization of osmotic dehydration of pear followed by conventional drying and their sensory quality, *LWT – Food Science and Technology*, 72, 407-415.
- Dan H., Kaiyang M., Dapeng L., Tao W., Zhongliang G., Bengt S. & Zan W. (2020).** Application of ultrasound technology in the drying of food products. *Ultrasonics - Sonochemistry* ,63, 1-11.
- Darvishi, H., Azadbakht M. & Noralahi B. (2018).** Experimental performance of mushroom fluidized bed drying: Effect of osmotic pretreatment and air recirculation, *Renewable Energy*, 120, 201- 208.
- DA-WAN Sun (2014).** Emerging technologies for food processing. Academic press, London, 653p.
- Da-Wen Sun (2006).** Thermal food processing: new technologies and quality issues. *Crcylor&farcis, new yourk*, 662.
- De Ancos B. , Gonzàlez, E.M. & Cano M.P. (2000).** Ellagic acid, vitamin C and total phenolic contents and radical scavenging capacity affected by freezing and frozen storage in raspberry fruit. *J. Agric. Food Chem.* 48, 4565-4570.
- de Jesus Junqueira, J. R., Corrêa J. L. G., de Mendonça K. S., Resende N. S. & de Barros Vilas Boas E. V. (2017).** Influence of sodium replacement and vacuum pulse on the osmotic dehydration of eggplant slices, *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 41, 10-18.
- de la Fuente-Blanco S., de Sarabia E.R.F., Acosta-Aparicio V.M., Blanco A. and Gallego-Juárez J.A. (2006).** Food drying process by power ultrasound. *Ultrasonics*. 44, 523-527.
- de Oliveira M.M., Tribst A.A.L., Júnior B.R.D.C.L., de Oliveira R.A. & Cristianini M., (2015).** Effects of high pressure processing on cocoyam, Peruvian carrot, and sweet potato: Changes in microstructure, physical characteristics, starch, and drying rate. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 31, 45–53.
- De Oliveira, L. F., Corrêa J. L. G., de Angelis Pereira M. C., de Lemos Souza Ramos A. & Vilela M. B. (2016).** Osmotic dehydration of yacon (*Smallanthus sonchifolius*): Optimization for fructan retention, *LWT - Food Science and Technology*, 71, 77-87.
- De Vito F., Ferrari G., Lebovka N.I., Shynkaryk N.V. & Vorobiev E. (2008).** Pulse duration and efficiency of soft cellular tissue disintegration by pulsed electric fields. *Food and Bioprocess Technology*, 1, 307-313

## References Bibliographies

---

- Dehghannya J., Gorbani R. & Ghanbarzadeh B. (2015).** Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on drying kinetics and effective moisture diffusivity of Mirabelle plum, *J. Food Process. Preserv.* 39, 2710–2717.
- Dehghannya J., Hosseinlar S.-H. & Heshmati M. K. (2017).** Multi-stage continuous and intermittent microwave drying of quince fruit coupled with osmotic dehydration and low temperature hot air drying, *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 45, 132-151.
- Dehghannya J., Kadkhodaei S., Heshmati M. K. & Ghanbarzadeh B. (2019).** Ultrasound-assisted intensification of a hybrid intermittent microwave - hot air drying process of potato: Quality aspects and energy consumption. *Ultrasonics*, 96, 104-122.
- Dehghannya J., Somayyeh B., & Maryam K. H. (2017).** Low temperature hot air drying of potato cubes subjected to osmotic dehydration and intermittent microwave: drying kinetics, energy consumption and product quality indexes. *Heat Mass Transfer*. 54, 929-954.
- Dehsheikh F. Nadery & Taghian Dinani S. (2019).** Coating pretreatment of banana slices using carboxymethyl cellulose in an ultrasonic system before convective drying *Ultrason. Sonochem*, 52, 401-413.
- Delgado A. E. & Sun D.-W. (2001).** Heat and mass transfer models for predicting freezing processes-A review. *Journal of Food Engineering*, 47(3), 157-174.
- Dellarosa N., Ragni L., Laghi L., Tylewicz U., Rocculi P. & Dalla Rosa M. (2016).** Time domain nuclear magnetic resonance to monitor mass transfer mechanisms in apple tissue promoted by osmotic dehydration combined with pulsed electric fields. *Innovat. Food Sci. Emerg. Technol.* 37 (Part C), 345-351.
- Demiray E. & Tulek Y. (2012).** Thin-layer drying of tomato (*Lycopersicum esculentum* Mill. cv. Rio Grande) slices in a convective hot air dryer. *Heat Mass Transf.* 48, 841-847.
- Demiray E. & Tulek Y. (2014).** Drying characteristics of garlic (*Allium Sativum* L.) slices in a convective hot air dryer. *Heat Mass Transf.* 50(6), 779-786.
- Demiray E. & Tulek Y. (2014).** Drying characteristics of garlic slice (*Allium sativum* L.) in a convection hot air dryer. *Transfert de chaleur et de masse*, 50, 779-786.
- Deng Y. & Zhao Y. (2008).** Effect of pulsed vacuum and ultrasound osmopretreatments on glass transition temperature, texture, microstructure and calcium penetration of dried apples (Fuji), *LWT Food Sci. Technol.* 41, 1575–1585.
- Dermesonlouglou E. K. (2007).** Stability of dehydrofrozen tomatoes pretreated with alternative osmotic solutes. *Food Engineering*(78), 272-280.
- Dermesonlouglou E., Chalkia A. & Taoukis P. (2018).** Application of Osmotic Dehydration to Improve the Quality of Dried Goji Berry, *Journal of Food Engineering*, 232, 36-43.
- Dermesonlouglou E., Chalkia A., Dimopoulos G. & Taoukis P. (2018).** Combined effect of pulsed electric field and osmotic dehydration pre-treatments on mass transfer and quality

## References Bibliographies

---

- of air dried goji berry. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 49, 106-115.
- Dev S. R. S., Geetha P., Orsat V., Gariépy Y. & Raghavan G. S. V. (2011).** Effects of Microwave-Assisted Hot Air Drying and Conventional Hot Air Drying on the Drying Kinetics, Color, Rehydration, and Volatiles of Moringa oleifera. *Drying Technology*, 29, 1452-1458.
- Dewanto V., Wu X. & Liu R. H. (2002).** Processed sweet corn has higher antioxidant activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50 (17), 4959-4964.
- Dias da Silva G., Barros Z. M. P., de Medeiros R. A. B., de Carvalho C. B. O., Rupert Brandão S. C. & Azoubel P. M. (2016).** Pretreatments for melon drying implementing ultrasound and vacuum. *Lwt*, 74, 114-119.
- Dixon G. M., Jenn J. J. & Paynter V. A. (1976).** Tasty apple slices result from combined osmotic dehydration and vacuum drying process. *Food Product Development*, 10, 60-66.
- Do Nascimento E. M. G. C., Mulet A., Ascheri J. L. R., de Carvalho C. W. P. & Cárcel J. A. (2016).** Effects of high-intensity ultrasound on drying kinetics and antioxidant properties of passion fruit peel. *Journal of Food Engineering*, 170, 108-118.
- Donsì F., Ferrari G. & Pataro G. (2010).** Applications of pulsed electric field treatments for the enhancement of mass transfer from vegetable tissue. *Food Engineering Reviews*, 2(2), 109-130.
- Doymaz (2011).** Drying of Pomegranate Arils and Selection of a Suitable Drying Model. *Food Biophysics*, 6, 461-467.
- Doymaz I. & Pala M. (2002).** Hot-air drying characteristics of red pepper. *J. Food Eng.* 55 (4), 331-335.
- Doymaz I. (2004).** Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *J. Food Eng.*, 61, 359-364.
- Doymaz I. (2012).** Drying of pomegranate seeds using infrared radiation. *Food Science and Biotechnology*, 21, 1269-1275.
- Dujmić F. et al. (2013).** Ultrasound-assisted infrared drying of pear slices: textural issues. *J. Food Process Eng.*, 36, 397-406.
- Dupont F. et Guinard J.L. (2007).** Botanique : Systématique moléculaire. 14<sup>ème</sup> édition. ed. Masson, Issy les Moulineaux.
- Dutta B., Raghavan G. S. V., Dev S. R. S., Liplap P., Murugesan R., Anekella K. & Kaushal T. (2012).** A Comparative Study on the Effects of Microwave and High Electric Field Pretreatments on Drying Kinetics and Quality of Mushrooms. *Drying Technology*, 30, 891-897.

## References Bibliographies

---

- Dziri S., Hassen I., Fatnassi S., Mrabet Y., Casabianca H., Hanchi B. & Hosni K. (2012).** Phenolic constituents, antioxidant and antimicrobial activities of rosy garlic (*Allium roseum* var. *odoratissimum*). *Journal of Functional Foods*, 4, 423-432.
- El Darra N., Grimi N., Maroun R.G., Louka N. & Vorobiev E. (2013).** Pulsed electric field, ultrasound, and thermal pretreatments for better phenolic extraction during red fermentation. *Eur. Food Res. Technol.* 236 (1), 47-56.
- El Kantar S., Boussetta N., Lebovka N., Foucart F., Rajha H. N., Maroun R. G., Louka N. & Vorobiev E. (2018).** Pulsed electric field treatment of citrus fruits: Improvement of juice and polyphenols extraction. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 46, 153-161.
- El-Aouar, Â. A., Azoubel P. c. M. & Murr F. E. X. (2003).** Drying kinetics of fresh and osmotically pretreated papaya (*Carica papaya* L.), *Journal of Food Engineering*, 59, 85-91.
- El-Ashmawy, N. E., Khedr E. G., El-Bahrawy H. A. & Selim H. M. (2016).** Gastroprotective effect of garlic in indomethacin induced gastric ulcer in rats. *Nutrition*, 32, 849-54.
- Elfalleh W., Guo L., He S., Wang P., Cui J. & Ma Y. (2015).** Characteristics of cell wall structure of green beans during controlled freezing point storage. *Int. J. Food Prop.* 18 (8), 1756-1772
- Ersus S. & 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.
- Ertekin C. & Yaldiz O. (2004).** "Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*, 63(3): 349-359.
- Espinoza Rodezno L. A., Sundararajan S., Solval K. M., Chotika A., Li J. & Zhang J. (2013).** Cryogenic and air blast freezing techniques and their effect on the quality of catfish fillets. *Food Science and Technology*, 54, 377-382.
- Fan X., Xi Y., Zhao H., Liu B., Cao J. & Jiang W. (2018).** Improving fresh apricot (*Prunus armeniaca* L.) quality and antioxidant capacity by storage at near freezing temperature. *Scientia Horticulturae*, 231, 1-10.
- Fante L. and Noreña C. P. Z. (2013).** Quality of hot air dried and freeze-dried of garlic (*Allium sativum* L.). *Journal of Food Science and Technology*, 52, 211-220.
- FAO Statistics Division (2016).** *Production and trade statistics*. Rome, Italy.
- Faridnia F., Burritt D.J., Bremer P.J. & Oey I. (2015).** Innovative approach to determine the effect of pulsed electric fields on the microstructure of whole potato tubers: Use of cell viability, microscopic images and ionic leakage measurements. *Food Research International*, 77, 556-564.

## References Bibliographies

---

- Fauster T., Giancaterino M., Pittia P. & Jaeger H. (2019).** Effect of pulsed electric field pretreatment on shrinkage, rehydration capacity and texture of freeze-dried plant materials. *Lwt*, 108937.
- Fazaeli M., Tahmasebi M. & Emam.Djomeh Z. (2012).** Characterization of food texture: application of Microscopic technology. *Current Microscopy Contributions to Advances in Science and Technology*.
- Fei M. L. I., Tong L. I., Wei L. I. & De Yang L. (2015).** Changes in antioxidant capacity, levels of soluble sugar, total polyphenol, organosulfur compound and constituents in garlic clove during storage. *Industrial Crops and Products*, 69, 137-142.
- Feng Y., Xu B., ElGasim A., Yagoub A., Ma H., Sun Y., Xu X., Yu X. and Zhou C. (2020).** Role of drying techniques on physical, rehydration, flavor, bioactive compounds and antioxidant characteristics of garlic. *Food Chemistry*, 343, 1-9.
- Feng Y., Zhou C., El Gasim A., Yagoub A., Sun Y., Owusu-Ansah P., Yu X., Wang X., Xu X., Zhang J. & Ren Z. (2019).** Improvement of the catalytic infrared drying process and quality characteristics of the dried garlic slices by ultrasound-assisted alcohol pretreatment. *Lwt*, 116.
- Fernandes F. A. N. & Rodrigues S. (2008a).** Application of ultrasound and ultrasound assisted osmotic dehydration in drying of fruits. *Drying Technology*, 26(12), 1509–1516.
- Fernandes F.A.N. & Rodrigues S. (2008b).** Dehydration of sapota (*Achras sapota* L.) using ultrasound as pretreatment. *Dry. Technol.* 26, 1232-1237.
- Fernandes F.A.N., Gallão M.I. & Rodrigues S. (2009).** Effect of osmosis and ultrasound on pineapple cell tissue structure during dehydration, *J. Food Eng.* 90 (2),186–190.
- Fernando W. J. N., Ahmad A. L., Abd.Shukor S. R. and Lok Y. H. (2008).** A model for constant temperature drying rates of case hardened slices of papaya and garlic. *Journal of Food Engineering*, 88, 229-238.
- Figiel A. (2009).** Drying kinetics and quality of vacuum-microwave dehydrated garlic cloves and slices. *J. Food Eng.* 94, 98-104.
- Fincan M. & Dejmek P. (2002).** In situ visualization of the effect of a pulsed electric field on plant tissue. *Journal of Food Engineering*, 55, 223-230.
- Fincan M. & Dejmek P. (2002).** In situ visualization of the effect of a pulsed electric field on plant tissue. *Journal of Food Engineering*, 55, 223–230.
- Floury J., Le Bail A. & Pham Q.T. (2008).** A three-dimensional numerical simulation of the osmotic dehydration of mango and effect of freezing on the mass transfer rates. *J. Food Eng.*,85,1-11.
- Fonteles T. V., Leite A. K., Silva A. R., Carneiro A. P., Miguel Ede C., Cavada B. S., Fernandes F. A. & 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, 237-249.



## References Bibliographies

---

- Food and Drug Administration (2000).** Kinetics of Microbial Inactivation for Alternative. *Food Processing Technologies*.
- Fuente-Blanco S., Riera-Franco de Sarabia E., Acosta-Aparicio V.M., Blanco-Blanco A. & Gallego-Juárez J.A. (2006).** Food drying process by power ultrasound. *Ultrasonics*, 44, 523–527.
- Gachovska T.K., Simpson M.V., Ngadi M.O. & Raghavan G. (2009).** Pulsed electric field treatment of carrots before drying and rehydration. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 89 (14), 2372-2376.
- Gachovska T.K., Adedeji A.A., Ngadi M. & Raghavan G.V.S. (2008).** Drying characteristics of carrots treated by pulsed electric field. *Drying technology*, 26 (10), 1244 -1250.
- 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. *Journal of Food Engineering*, 208, 19-27.
- Gamboa-Santos J., Montilla A., Carcel J. A., Villamiel M. & García-Perez J. V. (2014).** Air-borne ultrasound application in the convective drying of strawberry. *Journal of Food Engineering*, 128, 132-139.
- Garcia C.C., Mauro M.A. & Kimura M. (2007).** Kinetics of osmotic dehydration and air-drying of pumpkins (*Cucurbitamoschata*). *Journal of Food Engineering*, 82, 284-291.
- García-Martínez E.; Ruiz-Diaz G., Martínez-Monzó J. & Camacho, M.M. (2002).** Jam manufacture with osmodehydrated fruit. *Food Research International*,35, 2-3.
- Garcia-Perez J. V., Ortuño C., Puig A., Carcel J. A. & Perez-Munuera I. (2011).** Enhancement of water transport and microstructural changes induced by high-intensity ultrasound application on orange peel drying. *Food and Bioprocess Technology*, 5(6), 2256–2265.
- García-Pérez J., Rosselló C., Cárcel J., De la Fuente S., & Mulet A. (2007).** Effect of air temperature on convective drying assisted by high power ultrasound. *In Defect and Diffusion Forum*. Trans Tech Publ. Vol. 258, 563-574.
- García-Pérez J.V., Cárcel J.A., Simal S., García-Alvarado M. & AMulet A. (2013).** Ultrasonic intensification of grape stalk convective Drying: Kinetic and energy efficiency. *Drying Technology*, 31 (8), 942-950.
- Gennaro C., Antonio M., Onofrio C. & Luciano C. (2019).** Comparing different processing methods in apple slice drying. Part 1. Performance of microwave, hot air and hybrid methods at constant temperatures. *Biosystems engineering*, 188, 331-344.
- Ghasemi A. & 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*.

## References Bibliographies

---

- Ghesquiere C. (2016).** Les bienfaits de l'ail dans les maladies cardiovasculaires. Université de Picardie Jules Verne UFR de pharmacie. Thèse de doctorat.102.
- Giraldo G., Talens P., Fito P. & Chiralt A. (2003).** Influence of sucrose solution concentration on kinetics and yield during osmotic of mango. *J. Food Eng.*,58, 33-43.
- Giroux F. & Marouzé C. (1994).** Étude de dispositifs permettant l'agitation des produits dans les procédés de déshydratation/imprégnation par immersion. In : GFGP. *Agitation et mélange en biotechnologies alimentaire et industrie lle. Paris, Lavoisier-Tec & Doc*, 29-34.
- Goetz P., Ghédira K. (2012).** Phytothérapie anti-infectieuse, Collection phytothérapie practice. *Springer*, Paris.
- Goff H.D. (1992).** Low-temperature stability and the glassy state in frozen foods. *Food Res. Int.* 25, 317–325.
- Gomez Galindo F., Toledo R.T. & Sjeoholm I. (2005).** Tissue damage in heated carrot slices. Comparing mild hot water blanching and infrared heating. *J. Food Eng.* 67, 381-385.
- González E.M., de Ancos B. & Cano M.P. (2003).** Relation between bioactive compounds and free radical-scavenging capacity in berry fruits during frozen storage. *J. Sci. Food Agr.* 83, 722-726.
- Goula, A. M., Kokolaki M. & Daftsiou E. (2017).** Use of ultrasound for osmotic dehydration. The case of potatoes, *Food and Bioproducts Processing*, 105, 157-170.
- Grimi N., Mamouni F., Lebovka N., Vorobiev E. & Vaxelaire J. (2011).** Impact of apple processing modes on extracted juice quality: pressing assisted by pulsed electric fields. *J. Food Eng.* 103 (1), 52-61.
- Grimi N., Mamouni F., Lebovka N., Vorobiev E. & Vaxelaire J. (2010).** Acoustic impulse response in apple tissues treated by pulsed electric field. *Biosystems Engineering*, 105(2), 266-272.
- Guderjan M., Elez-Martínez P. & Knorr D. (2007).** Application of pulsed electric fields at oil yield and content of functional food ingredients at the production of rapeseed oil. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 8 (1), 55-62.
- Haciseferogullari H., Oscan M., Demir F. & Calisir, S. (2005).** Some nutritional and technological properties of garlic (*Allium sativum* L.). *Journal of Food Engineering*, 68, 463-469.
- Haciseferoğulları H., Özcan M., Demir F. & Çalışır S. (2005).** Some nutritional and technological properties of garlic (*Allium sativum* L.). *Journal of Food Engineering*, 68, 463-469.
- 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.

## References Bibliographies

---

- 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
- 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.
- 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.
- Hatakeyama T., Iijima M. & Hatakeyama H. (2016).** Role of bound water on structural change of water insoluble polysaccharides. *Food Hydrocolloids*, 53, 62–68.
- Heinz V., Knorr D. (2001).** Effects of High Pressure on spores. In *Ultra high Pressure of Foods*.
- Heredia, A., Peinado I., Rosa E., Andrés A. & Escriche I. (2012).** Volatile profile of dehydrated cherry tomato: Influences of osmotic pre-treatment and microwave power, *Food Chemistry*, 130, 889-895.
- Hirata S., M. Abdelrahman, Yamauchi N. & Shigyo M. (2015).** Characteristics of chemical components in genetic resources of garlic *Allium sativum* collected from all over the world. *Genetic Resources and Crop Evolution*.
- Horuz E., Jaafara H. & Maskan M. (2017).** Ultrasonication as pretreatment for drying of tomato slices in a hot air–microwave hybrid oven. *Dry. Technol.* 35: 849–859.
- Huang W., Feng Z., Aila R., Hou Y., Carne A. & Bekhit A. E. A. (2019).** Effect of pulsed electric fields (PEF) on physico-chemical properties, beta-carotene and antioxidant activity of air-dried apricots. *Food Chem*, 291, 253-262.
- Huang W., Feng Z., Aila R., Hou Y., Carne A. & Bekhit A. E. A. (2019).** Effect of pulsed electric fields (PEF) on physico-chemical properties, beta-carotene and antioxidant activity of air-dried apricots. *Food Chem*, 291, 253-262.
- İlter I., Akyl S., Devseren E., Okut D., Koç M. & Kaymak Ertekin F. (2018).** Microwave and hot air drying of garlic puree: drying kinetics and quality characteristics. *Heat and Mass Transfer*, 54, 2101-2112.
- ISO (2005).** Determination of substances characteristic of green and black tea – Part 1: Content of total polyphenols in tea – Colorimetric method using Folin-Ciocalteu reagent. ISO14502-1.
- Itaya Y., Okouchi K., Uchiyama S., Hasatanit M. & Mori S. (2002).** Internal Heating Effect and Application of Microwaves with Fluidization of Electrically Conductive Particles in the Ceramic Drying Process Do. *Chem. Eng. Mine. Process.* 10 (3), 381-400.

## References Bibliographies

---

- Jaeger H., Schulz M., Lu P. & Knorr D. (2012).** Adjustment of milling, mash electroporation and pressing for the development of a PEF assisted juice production in industrial scale. *Innovative Food Sci. Emerging Technol.* 14, 46- 60.
- Jambrak A. R., Mason T. J., Paniwnyk L. & Lelas V. (2007).** Accelerated drying of button mushrooms, Brussels sprouts and cauliflower by applying power ultrasound and its rehydration properties. *Journal of Food Engineering*, 81, 88-97.
- James C., Hanser P. & James S.J. (2011).** Super-cooling phenomena in fruits, vegetables and seafoods. In: 11th International Congress on Engineering and Food (ICEF) (Athens, Greece).
- Janositz A. & Knorr D. (2010).** Microscopic visualization of pulsed electric field induced changes on plant cellular level. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 11(4), 592-597.
- Janositz A., Semrau J. & Knorr D. (2011).** Impact of PEF treatment on quality parameters of white asparagus (*Asparagus officinalis* L.). *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 12(3), 269-274.
- Jeantet R., Croguennec T., Schuck P. & Brulé G. (2006).** *Food Science*. Lavoisier-Tec and Doc. Paris, 576.
- Jha P. K., Chevallier S., Xanthakis E., Jury V. & Le-Bail A. (2020).** Effect of innovative microwave assisted freezing (MAF) on the quality attributes of apples and potatoes. *Food Chem*, 309.
- Ji L., Pang J. & Li S. (2012).** Application of new physical storage technology in fruit and vegetable industry. *Afr. J. Biotechnol.* 11 (25), 6718-6722.
- Jiang N., Chunquan Liu, Dajing Li, Zhongyuan Z. & Yongjun Z. (2016).** Effect of thermosonic pretreatment on drying kinetics and energy consumption of microwave vacuum dried *Agaricus bisporus* slices. *J. Food Eng.*, 177, 21-30
- Jiang Q., Zhang M. & Xu B. (2020).** Application of ultrasonic technology in postharvested fruits and vegetables storage: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 69, 1-12.
- Jiménez-Hernández, J., Estrada-Bahena E. B., Maldonado-Astudillo Y. I., Talavera-Mendoza Ó., Arámbula-Villa G., Azuara E., Álvarez-Fitz P., Ramírez M. & Salazar R. (2017).** Osmotic dehydration of mango with impregnation of inulin and piquinpepper oleoresin, *LWT - Food Science and Technology*, 79, 609-615.
- Jing L., Wang Y., Wang R., Wang C., Luo D. & Wu H. (2016).** Research article effects of controlled freezing-point storage on quality of fresh-cut broccoli. *Adv. J. Food Sci. Technol.* 6, 317-325.
- Junqueira, J. R. d. J., Corrêa J. L. G., de Oliveira H. M., Ivo Soares Avelar R. & Salles Pio L. A. (2017).** Convective drying of cape gooseberry fruits: Effect of pretreatments on kinetics and quality parameters, *LWT - Food Science and Technology*, 82, 404-410.

## References Bibliographies

---

- Kadam S. U., Tiwari B. K. & O'Donnell C. P. (2015).** Effect of ultrasound pre-treatment on the drying kinetics of brown seaweed *Ascophyllum nodosum*. *Ultrasonics Sonochemistry*, 23, 302–307.
- Kaleemullah S. & Kailappan R. (2005).** Drying kinetics of red chilies in rotary dryer. *Biosyst Eng.* 92,15-23.
- Kalt W. (2005).** Effects of production and processing factors on major fruit and vegetable antioxidants. *Journal of Food Science*, 70(1), 11-19.
- Kambiz S. (2008).** Effects of Pulsed Electric Field Processing on Microbial, Enzymatic and Physical Attributes of Milk and the Rennet-Induced Milk Gels”. Thèse de Doctorat, School of Applied Sciences College of Science, Engineering and Technology RMIT University.
- Karimi M., Ghasemi A., Zangabad P. S., Rahighi R., Basri S.M.M. & Mirshekari H. (2016).** Smart micro/nanoparticles in stimulus-responsive drug/gene delivery systems. *Chemical Society Reviews*, 45 (5), 1457-1501.
- Kaushal, P. & Sharma H. K. (2016).** Osmo-convective dehydration kinetics of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*), *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 15, 118-126.
- Kek S. P., Chin N. L. & Yusof Y. A. (2013).** Direct and indirect power ultrasound assisted pre-osmotic treatments in convective drying of guava slices. *Food and Bioproducts Processing*, 91, 495-506.
- Khoyi, M. R. & Hesari J. (2007).** Osmotic dehydration kinetics of apricot using sucrose solution. *Journal of Food Engineering*, 78, 1355-1360.
- Kim K. W., Kim Y.-T., Kim M., Noh B. S. & Choi W.-S. (2014).** Effect of high hydrostatic pressure (HHP) treatment on flavor, physicochemical properties and biological functionalities of garlic. *LWT - Food Science and Technology*, 55, 347-354.
- Kim Y.-N., Kwon H.-J. & Lee D.-U. (2019).** Effects of pulsed electric field (PEF) treatment on physic chemical properties of *Panax ginseng*. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 58, 102232.
- Kim, J. S., Kang O. K., & Gweon O. C. (2013).** Comparison of phenolic acids and flavonoids in black garlic at different thermal processing steps. *Journal of Functional Foods*, 5, 80-86.
- Knorr D., Froehling A., Jaeger H., Reineke K., Schlueter, O., Schoessler, K., (2011).** Cold plasma decontamination of foods. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2, 203-235.
- Kono, S., H. Imamura & K. Nakagawa (2021).** Non-destructive monitoring of food freezing process by microwave resonance spectroscopy with an open-ended coaxial resonator. *Journal of Food Engineering*, 292.

## References Bibliographies

---

- Koubaa M., Barba F. J., Grimi N., Mhemdi H., Koubaa W., Boussetta N., & Vorobiev E. (2016).** Recovery of colorants from red prickly pear peels and pulps enhanced by pulsed electric field and ultrasound. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 37, 336-344.
- Kowalska H., Lenart A. & Leszczyk D. (2008).** The effect of blanching and freezing on osmotic dehydration of pumpkin. *J. Food Eng.*, 86, 30-38.
- Kowalski S., Mierzwa D. & Stasiak M. (2017).** Ultrasound-assisted convective drying of apples at different process conditions. *Dry. Technol.* 35, 939–947.
- Kraus W. (2003).** The beet campaign -VDZ Zweigverein Süd. *Zuckerindustrie* 128 (5), 344-354.
- Kroehnke J., Musielak G. & Boratyńska A. (2014).** Convective drying of potato assisted by ultrasound. *PhD Interdisciplinary Journal*, 1, 57-65.
- Kroehnke J., Radziejewska-Kubzdela E., Musielak G. & Stasiak S. (2015).** Ultrasonic-assisted and microwave -assisted convective drying of Carrot: Drying kinetics and quality analysis. Proceedings of the 5th european drying conference (Eurodrying'2015), 195-201.
- Kroehnke J., Szadzinska J., Stasiak M., Radziejewska-Kubzdela E., Bieganska-Marecik R. & Musielak G. (2018).** Ultrasound- and microwave-assisted convective drying of carrots - Process kinetics and product's quality analysis. *Ultrason Sonochem*, 48, 249-258.
- Kyung K. H. (2012).** Antimicrobial properties of allium species. *Current Opinion in Biotechnology*, 23 (2), 142-147.
- La Fuente C.I.A., Zabalaga R.F. & Tadini C.C. (2017).** Combined effects of ultrasound and pulsed-vacuum on air-drying to obtain unripe banana flour. *Innovative Food Sci. Emerg. Technol.*, 44, 123-130.
- Lamanauskas N., Bobinaitė R., Šatkauskas S., Viškelis P., Pataro G. & Ferrari G. (2015).** Pulsed electric field-assisted juice extraction of frozen/thawed blueberries. *Zemdirbyste-Agriculture*, 102, 59-66.
- Lamanauskas N., Šatkauskas S., Bobinaitė R. & Viškelis P. (2015).** Impact of the pulsed electric field (PEF) on the drying efficiency of *Actinidiakolomikta*. *Journal of Food Process Engineering*, 38 (3), 243- 249.
- Lammerskitten A., Mykhailyk V., Wiktor A., Toepfl S., Nowacka M., Bialik M., Czyżewski J., Witrowa-Rajchert D. & Parniakov O. (2019).** Impact of pulsed electric fields on physical properties of freeze-dried apple tissue. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 57.
- Lanzotti V., Scala F. & Bonanomi G., (2014).** Compounds from *Allium* species with cytotoxic and antimicrobial activity, *Phytochem. Rev.*, 13, 769-791.

## References Bibliographies

---

- Lazaride H. N., Katsanidis E. & Nickolaidis A. (1995).** Mass transfer kinetics during osmotic preconcentration aiming at minimal solid uptake. *Food engineering*(25), 151-166.
- Leadley C. E. & Williams A. (2006).** Pulsed electric field processing, power ultrasound and other emerging technologies. In James G. Brennan (Ed.), *Food processing hand book*. Weinheim: Wiley-Vch Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Lebovka N. I., Mhemdi H., Grimi N., Bals O. & Vorobiev E. (2014).** Treatment of potato tissue by pulsed electric fields with time-variable strength: theoretical and experimental analysis. *Journal of Food Engineering*, 137, 23-31.
- Lebovka N. I., N. V. Shynkaryk & Vorobiev E. (2007).** Pulsed electric field enhanced drying of potato tissue. *Journal of Food Engineering*, 78, 606-613.
- Lebovka N.I., Bazhal M.I. & Vorobiev E. (2002).** Estimation of characteristic damage time of food materials in pulsed-electric fields. *Journal of Food Engineering*, 54(4): 337-346.
- Lebovka N.I., Praporscic I. & Vorobiev E. (2004a).** Combined treatment of apples by pulsed electric fields and by heating at moderate temperature. *Journal of Food Engineering*, 65:211-217.
- Lee D. U., Heinz V., & Knorr, D. (2003).** Effects of combination treatments of nisin and high intensity ultrasound with pressure on the microbial inactivation in liquid whole egg. *Innovative Food Science and Engineering Technologies*, 4, 387–393.
- Lenart A. (1996).** Osmo-convective drying of fruit and vegetable: technology and application. *Drying technology* (14), 391-413.
- Lenart A., Flink J.M. (1984).** Osmotic concentration of potato-I: Criteria for the end of point of the osmosis process. *J. Food Sci Technol*, 19,45–48.
- Lewicki P.P. & Pawlak G. (2003).** Effect of drying on microstructure of plant tissue. *Drying Technology*, 21 (4), 657-683.
- Li F.M., Li T., Li W. & Yang L.D. (2015).** Changes in antioxidant capacity, levels of soluble sugar, total polyphenol, organosulfur compound and constituents in garlic clove during storage. *Industrial Crops and Products*, 649 69, 137-142.
- Li P. & Chen Z. (2017).** Experiment study on porous fiber drying enhancement with application of power ultrasound. *Applied Acoustics*, 127, 169-174.
- Li Y., Xu S.-Y. & Sun D.-W. (2007).** Preparation of garlic powder with high allicin content by using combined microwave–vacuum and vacuum drying as well as microencapsulation. *Journal of Food Engineering*, 83, 76-83.
- Lichtenthaler H. (1987).** Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes, *Methods Enzymol.* 148, 350–382.
- Liu C., Grimi N., Lebovka N. & Vorobiev E. (2018).** Effects of pulsed electric fields treatment on vacuum drying of potato tissue. *Lwt*, 95, 289-294.

- Liu D.-K., Xu C.-C., Guo C.-X. & Zhang X.-X. (2020).** Sub-zero temperature preservation of fruits and vegetables: A review. *Journal of Food Engineering*, 275.
- Liu J., Ji F., Chen F., Guo W., Yang M., Huang S., Zhang F. & Liu Y. (2018).** Determination of garlic phenolic compounds using supercritical fluid extraction coupled to supercritical fluid chromatography/tandem mass spectrometry. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 159, 513-523.
- Liu T. , Dodds E. , Leong S.Y. , Eyres G.T. , Burritt D.J. & Oey I. (2017).** Effect of pulsed electric fields on the structure and frying quality of “kumara” sweet potato tubers. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 245, 890-898.
- Liu T., Burritt D. J. & Oey I. (2019).** Understanding the effect of Pulsed Electric Fields on multilayered solid plant foods: Bunching onions (*Allium fistulosum*) as a model system. *Food Res Int*, 120, 560-567.
- Llavata, B., J. V. García-Pérez, S. Simal & J. A. Cárcel (2020).** Innovative pre-treatments to enhance food drying: a current review. *Current Opinion in Food Science*, 35, 20-26.
- Loginova K. V., Lebovka N. I. & Vorobiev E. (2011).** Pulsed electric field assisted aqueous extraction of colorants from red beet. *Journal of Food Engineering*, 106, 127-133.
- Lohani U.C. & Muthukumarappan K. (2016).** Application of the pulsed electric field to release bound phenolics in sorghum flour and apple pomace. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 35, 29–35.
- Lopez J., Uribe E., Vega-galvez A., Miranda M., Vergara J., Gonzalez E. & DI scala K. (2010).** Effect of air temperature on drying kinetics, vitamin c, antioxidant activity, total phenolic content, non-enzymatic browning and firmness of blueberries variety ONeil. *Food Bioprocess Technol.* 3, 772-777.
- López-Gámez G., Elez-Martínez P., Martín-Belloso O. & 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 and Emerging Technologies*, 59.
- Lorentzen G., Hustad A., Lian F., Grip A. E., Schrødter E., Medeiros T. & Siikavuopio S. I. (2020).** Effect of freezing methods, frozen storage time, and thawing methods on the quality of mildly cooked snow crab (*Chionoecetes opilio*) clusters. *Lwt*, 123, 103-109.
- Lu X., Li N., Qiao X., Qiu Z. & Liu P. (2018).** Effects of thermal treatment on polysaccharide degradation during black garlic processing. *Lwt*, 95, 223-229.
- Luengo E., Álvarez I., & Raso J. (2014).** Improving carotenoid extraction from tomato waste by pulsed electric fields. *Frontiers in Nutrition*, 1, 12.
- Madamba P.S., Driscollb R.H. & Buckleb K.A. (1996).** The thin layer drying characteristics of garlic slices. *J Food Eng.* 29, 75-97.
- Magalhães M. L., Cartaxo S. J. M., Gallão M. I., García-Pérez J. V., Cárcel J. A., Rodrigues S. & Fernandes F. A. N. (2017).** Drying intensification combining



## References Bibliographies

---

- ultrasound pre-treatment and ultrasound-assisted air drying. *Journal of Food Engineering*, 215, 72-77.
- Marani C. M., Agnelli M. E. & Mascheroni R. H. (2007).** Osmo-frozen fruits: mass transfer and quality evaluation. *Journal of Food Engineering*, 79, 1122-1130.
- Marouzé C., Giroux F., Collignan A. & Rivier M. (2001).** Equipment design for osmotic treatments. *J. Food Eng.*, 49, 207-221.
- Martins N., Petropoulos S. & Ferreira I. C. (2016).** Chemical composition and bioactive compounds of garlic (*Allium sativum* L.) as affected by pre- and post-harvest conditions: A review. *Food Chem*, 211, 41-50.
- Maskan M. (2001).** Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying, *J. Food Eng.* 48, 177–182.
- Md Salim N. S., Gariépy Y. & Raghavan V. (2017).** Hot Air Drying and Microwave-Assisted Hot Air Drying of Broccoli Stalk Slices (*Brassica oleracea* L. Var. Italica). *Journal of Food Processing and Preservation*, 41.
- Medina-Meza I., Boioli P. & Barbosa-Cánovas G.V. (2016).** Assessment of the effects of ultrasonics and pulsed electric fields on nutritional and rheological properties of raspberry and blueberry purees. *Food Bioprocess Technology*, 9 (3), 520-531,
- Meneses N., Jaege H. & Knorr D. (2011a).** pH-changes during pulsed electric field treatments- Numerical simulation and in situ impact on polyphenoloxidase .
- Menon, A., V. Stojceska & S. A. Tassou (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 S. (2011).** Drying kinetics of olive pomace in a fluidized bed dryer. *Energy Conversion and Management*, 52, 1644-1649.
- Michalska Honke J. , Lysiak G. & Andlauer W. (2016).** Effect of drying parameters on the formation of early and intermediate stage products of the Maillard reaction in different plum (*Prunus domestica* L.) cultivars. *LWT – Food Science and Technology*, 65, 932-938.
- Midilli A., Kucuk H. & Yapar Z. (2002).** A new model for single-layer drying. *Dry Technol*, 20, 1503-1513.
- Milner, J. A. (2010).** Garlic and cancer prevention. In J. A. Milner and D. F. Romagnolo (Eds.), Bioactive compounds and cancer. *Nutrition and health*, 567-588.
- Moelants K. R. N., Cardinaels R., Van Buggenhout S., Van Loey A. M., Moldenaers P., & Hendrickx M. E. (2014).** A review on the relationships between processing, food structure, and rheological properties of plant-tissue-based food suspensions. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 13(3), 241-260.

## References Bibliographies

---

- Moens L. G., De Laet E., Van Wambeke J., Van Loey A. M. & Hendrickx M. E. G. (2020).** Pulsed electric field and mild thermal processing affect the cooking behaviour of carrot tissues (*Daucus carota*) and the degree of methylesterification of carrot pectin. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 66.
- Morales-de la Pena M., Salvia-Trujillo L., Rojas-Grau M. A. & Martin-Belloso O. (2011).** Changes on phenolic and carotenoid composition of high intensity pulsed electric field and thermally treated fruit juice-soymilk beverages during refrigerated storage. *Food Chem*, 129, 982-90.
- Moreno J., Simpson R., Pizarro N., Pavez C., Dorvil F., Petzold G. & Bugueño G. (2013).** Influence of ohmic heating/osmotic dehydration treatments on polyphenoloxidase inactivation, physical properties and microbial stability of apples (cv. Granny Smith), *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 20, 198-207.
- Motevali A. & Hashemi S.J. (2016).** Effect of the various pretreatment on color change and texture characteristics in drying of apple slice, Iran. *J. Sci. Technol. Food*. 75,123–136.
- Mothibe K. J., Zhang M., Nsor-atindana J. & Wang Y.C. (2011).** Use of ultrasound pretreatment in drying of fruits: Drying rates, quality attributes, and shelf life extension. *Drying Technology*, 29(14), 1611–1621.
- Musielak G., Mierzwa D. & Kroehnke J. (2016).** Food drying enhancement by ultrasound – A review. *Trends in Food Science & Technology*, 56, 126-141.
- N’Goranz. E. B., Sadat A., Assidjo E. N. & Kouame P. (2012).** Etude de l’influence des paramètres de la déshydratation osmotique sur la perte en eau des fruits tropicaux: essais avec la papaye (*Carica papaya*) et la mangue (*Mangifera indica*), *Journal of Applied Biosciences*, 59, 4330– 4339.
- Nagella P., Thiruvengadam M., Ahmad A., Yoon J.Y. & I.M. (2014).** Chung Composition of polyphenols and antioxidant activity of garlic bulbs collected from different Locations of Korea Asian. *Journal of Chemistry*, 26 (3), 897-902.
- Naidu, P. B., Sathibabu Uddandrao V. V., Naik R. R., Pothani S., Muniyally P. K., Meriga B., Begum M. S., Varatharaju C., Pandiyan R. & Saravanan G.( 2016).** Effects of S-Allylcysteine on Biomarkers of the Polyol Pathway in Rats with Type 2 Diabetes. *Can J Diabetes*, 40, 442-448.
- Nair G.R., Liplap P., Garipey Y. & Raghavan G. (2012).** Effect of microwave and hot air drying on flax straw at controlled temperatures. *Int. J. Postharvest Technol. Innov.* 2, 355-369.
- Ngo S.N., Williams D.B., Cobiac L. & Head R.J. (2007).** Does garlic reduce risk of colorectal cancer? A systematic review. *J. Nutr.* 137 (10), 2264-2269.
- Nieto A.B., Salvatori D.M., Castro M.A. & Alzamora S.M. (2004).** Structural changes in apple tissue during glucose and sucrose osmotic dehydration: shrinkage, porosity, density and microscopic features. *J. Food Eng.*,61, 269-278.

## References Bibliographies

---

- Nono Y. J., Giroux F., Cuq B. & Raoult-Wack A.L. (2001).** Etude des parametres de controle et de commande du procede de deshydratation–impregnation par immersion, sur systeme probatoire automatise: application au traitement des pommes “Golden, *Journal of Food Engineering*, 4, 203-210.
- Noomhorm Athapol, (2007).** Overview of dehydration Method on Quality of fruit and Vegetable. *SWU. Sci. J.* 23 : 2550-2562.
- Nout R., Hounhouigan J.D. & Boekel T.V. (2003).** Food: processing, preservation and quality. *Backhuys. Germany*, 268.
- Nowacka M. & Wedzik M. (2016).** Effect of ultrasound treatment on microstructure, colour and carotenoid content in fresh and dried carrot tissue. *Applied Acoustics*, 103, 163-171.
- Nowacka M., Wiktor A., Anuszevska A., Dadan M., Rybak K. & 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. *Ultrason Sonochem*, 56, 1-13.
- Nowacka M., Wiktor A., Śledź M., Jurek N. & Witrowa-Rajchert D. (2012).** Drying of ultrasound pretreated apple and its selected physical properties, *J. Food Eng.* 113 427–433.
- Nuutila A. M., Puupponen P. R., Aarni M. & Oksman-Caldentey K. M. (2003).** Comparison of antioxidant activities of onion and garlic extracts by inhibition of lipid peroxidation and radical scavenging activity. *Food Chemistry*, 81, 485-493.
- Odriozola-Serrano I., Aguilo-Aguayo I., Soliva-Fortuny R. & Martin-Belloso O. (2013).** Pulsed electric fields processing effects on quality and health-related constituents of plant-based foods. *Trends in Food Science and Technology*, 29 (2), 98-107.
- Odriozola-Serrano I., Soliva-Fortuny R., Hernández-Jover T. & Martín-Belloso O. (2009).** Carotenoid and phenolic profile of tomato juices processed by high intensity pulsed electric fields compared with conventional thermal treatments. *Food Chemistry*, 112(1), 258-266.
- Omar S. H. (2013).** Garlic and cardiovascular diseases. *Natural products. Springer*, 3661-3696.
- Omolola A. O., Kapila P. F. & Silungwe H. M. (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., Janius R. B., Nawi N. M. & Abdan K. (2016).** Modeling the Thin-Layer Drying of Fruits and Vegetables: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15, 599-618.
- Ortuno C., Perez-Munuera I., Puig A. & Riera E. (2010).** Influence of power ultrasound application on mass transport and microstructure of orange peel during hot air drying. *Phys. Procedia*. 3, 153-159.

## References Bibliographies

---

- Ostermeier R., Giersemehl P., Siemer C., Töpfl S. & 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.
- Ozuna C., Garcel J.A., García-Perez J.V. & Mulet A. (2011).** Improvement of water transport mechanisms during potato drying by applying ultrasound. *J. Sci. Food Agric.* 91, 2511-2517.
- Ozuna C., Mulet A., García-Pérez J.V., Riera E. & Cárcel J.A. (2014).** Influence of vegetable structure on ultrasonically assisted convective drying. Proceedings of the 19th international drying symposium (IDS 2014). Lyon, France.
- Papu S., Singh A., Jaivir S., Sweta S., Arya A. M., & Singh B. R. (2014).** Effect of Drying Characteristics of Garlic-A Review. *Journal of Food Processing & Technology*, 5, 318-323.
- Parak K. J., Bin A. & Bord F. P. (2002).** Drying of pear d'anjou with and without osmotic dehydration. *Food Engineering* (56), 97-103.
- Parniakov O., Bals O., Lebovka N. & Vorobiev E. (2016).** Pulsed electric field assisted vacuum freeze-drying of apple tissue. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 35, 52-57.
- Pedraza-Chaverri, J., Medina-Campos O. N. & Segoviano-Murillo S. (2007).** Effect of heating on peroxynitrite scavenging capacity of garlic, *Food Chem Toxicol*, 45, 622-7.
- Perera C.O. (2005).** Selected quality attributes of dried foods. *Drying Technol.*, 23, 717-730.
- Petropoulos S., Fernandes A., Barros L., Ciric A., Sokovic M. & Ferreira I. (2018).** Antimicrobial and antioxidant properties of various Greek garlic genotypes. *Food Chem*, 245, 7-12.
- Piga A., Del Caro A. & Corda G. (2003)** From plums to prunes: Influence of drying parameters on polyphenols and antioxidant activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51, 3675-3681.
- Piljac-Žegarac J. & Šamec D. (2011).** Antioxidant stability of small fruits in postharvest storage at room and refrigerator temperatures. *Food Res. Int.* 44, 345-350.
- Povey M. & Mason T. (1998).** Ultrasound in food processing. London, Blackie Academic and Professional.
- Priyanka K. & Saleem S. (2014).** Effect of Pulsed Electric Field on Drying Rate and Physical Characteristics of Potato Slices. *International journal for research in applied science and engineering technology (ijraset)*, 2, 2321-9653.
- Prosapio, V. & Norton I. (2017).** Influence of osmotic dehydration pre-treatment on oven drying and freeze drying performance, *Lwt*, 80, 401-408.
- Qiu, L., M. Zhang, B. Chitrakar & B. Bhandari (2020)** Application of power ultrasound in freezing and thawing Processes: Effect on process efficiency and product quality. *Ultrasonics Sonochemistry*, 68.

## References Bibliographies

---

- Rahman M. S. & Perera C. O. (1999).** *Drying and food preservation.* In M. S. Rahman (Ed.), *Handbook of food preservation.* : Marcel Dekker. New York.
- Ramos I.N., Brandao T.R.S. & Silva C.L.M. (2003).** Structural changes during air drying of fruits and vegetables. *Journal of Agrochemistry and Food Technology*, 9 (3), 201-206.
- Raoult-Wack A. L. (1994).** Recent advanced in the osmotic dehydration of foods. *Food science Technology*(5), 255-260.
- Rastogi N.K. & Raghavarao K.S.M.S. (2004).** Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple: considering Fickian diffusion in cubical configuration. *Lebensm. Wiss. Technol.*, 37, 43-47.
- Reinkensmeier A., Steinbrenner K., Homann T., Bußler S., Rohn S. & Rawel H. M. (2016).** Monitoring the apple polyphenol oxidase-modulated adduct formation of phenolic and amino compounds. *Food Chemistry*, 194, 76-85.
- Ren F., Perussello C. A., Zhang Z., Kerry J. P. & Tiwari B. K. (2018).** Impact of ultrasound and blanching on functional properties of hot-air dried and freeze dried onions. *Lwt*, 87, 102-111.
- Reyes A., Ceron S., Zuniga R. & Moyano P. (2007).** Comparative study of microwave assisted air drying potato slices. *Biosyst. Eng.* 98, 310-318.
- Ricce C., Rojas M. L., Miano A. C., Siche R. & Augusto P. E. D. (2016).** Ultrasound pre-treatment enhances the carrot drying and rehydration. *Food Research International*, 89, 701-708.
- Rivas A., Rodrigo D., Martinez A., Barbosa-Canovas G.V. & Rodrigo M. (2006).** Effect of PEF and heat pasteurization on the physical-chemical characteristics of blended orange and carrot juice. *LWT-Food Sci. Technol.*, 39, 1163-1170.
- Rodrigues S. & Fernandes F.A.N. (2007).** Use of ultrasound as pretreatment for dehydration of melons, *Drying Technol.* 25, 1791–1796.
- Rodríguez J., Mulet A. & Bon J. (2014).** Influence of high-intensity ultrasound on drying kinetics in fixed beds of high porosity, *J. Food Eng.* 127, 93–102.
- Rodríguez Ó., Santacatalina J. V., Simal S., Garcia-Perez J. V., Femenia A. & Rosselló C. (2014a).** Influence of power ultrasound application on drying kinetics of apple and its antioxidant and microstructural properties, 129, 21–29.
- Rodríguez Ó., et al. (2019).** Application of power ultrasound on the convective drying of fruits and vegetables: effects on quality. *J. Sci. Food Agri.*, 99, 966.
- Rogov I. A. & Gorbatov A. V. (1974).** Physical methods of food treatment. Moscow: Pischevayapromyshlennost (in Russian).

## References Bibliographies

---

- Rojas M. L., Augusto P. E. D. & Cárcel J. A. (2020).** Ethanol pre-treatment to ultrasound-assisted convective drying of apple. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*.
- Romero J. C. & Yopez V. B. (2015).** Ultrasound as pretreatment to convective drying of Andean blackberry (*Rubus glaucus* Benth). *Ultrason Sonochem*, 22, 205-210.
- Sabarez H.T., Gallego-Juárez J.A. & Riera E. (2012).** Ultrasonic-assisted convective drying of apple slices. *Drying Technology*, 30 (9), 989-997.
- Sabetghadam M. & Tavakolipour H. (2015).** Osmocoating and ultrasonic dehydration as pretreatment for hot air-drying of flavored apple, *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 8, 318- 327.
- Sablani S.S., Rahman M.S., Al-Kuseibi M.K., Al-Habsi N.A., Al-Belushi R.H., Al-Marhubi I. & Al-Amri I.S. (2007).** Influence of shelf temperature on pore formation in garlic during freeze-drying. *J. Food Eng.* 80, 68-79.
- Sacilik K. & Unal G. (2005).** Dehydration characteristics of Kastamonu garlic slices. *Biosyst. Eng.* 92, 207-215.
- Sacilik K. (2007).** Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (*Cucurbita pepo* L.). *Journal of Food Engineering*, 79, 23-30.
- Sadin R., Chegini G.R. & Sadin H. (2014).** The effect of temperature and slice thickness on drying kinetics tomato in the infrared dryer. *Heat Mass Transf* 50(4),501-507.
- Sadot M., Curet S., Rouaud O., Le-bail A. & Havet M. (2017).** Numerical modelling of an innovative microwave assisted freezing process. *International Journal of Refrigeration*, 80, 66–76.
- Sagar V. & Kumar P.S (2010).** Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 47 (1), 15-26.
- Şahin U. & Öztürk H. K. (2016).** Effects of pulsed vacuum osmotic dehydration (PVOD) on drying kinetics of figs (*Ficus carica* L.), *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 36, 104-111.
- Samavatean N., Raffie S., Mobli H. & Mohammadi A. (2011).** An analysis of energy use and relation between energy inputs and yield, costs and income of garlic production in Iran. *Renewable Energy*, 36, 1808-1813.
- Sánchez-Moreno C., Plaza L., Elez-Martínez P., De Ancos B., Martín-Belloso O., & Cano M. P. (2005).** Impact of high pressure and pulsed electric fields on bioactive compounds and antioxidant activity of orange juice in comparison with traditional thermal processing. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(11), 4403–4409.
- Santacatalina J., Rodríguez O., Simal S., Cárcel J., Mulet A. & García-Pérez,J.V.( 2014).** Ultrasonically enhanced low-temperature drying of apple: influence on drying kinetics and antioxidant potential. *J. Food Eng.* 138, 35–44.

## References Bibliographies

---

- Santos, M. D., R. P. Queirós, L. G. Fidalgo, R. S. Inácio, R. P. Lopes, M. J. Mota, S. G. Sousa, I. Delgadillo & J. A. Saraiva (2015).** Preservation of a highly perishable food, watermelon juice, at and above room temperature under mild pressure (hyperbaric storage) as an alternative to refrigeration. *LWT - Food Science and Technology*, 62, 901-905.
- Saulis G. (2010).** Electroporation of cell membranes: The fundamental effects of pulsed electric fields in food processing. *Food Engineering Reviews*, 2 (2), 52-73.
- Schiffmann F. (1992).** Microwave processing in the US food industry. *Food Technol.* 56: 50-52.
- Semenoglou I., Dimopoulos G., Tsironi T. & Taoukis P. (2020).** Mathematical modelling of the effect of solution concentration and the combined application of pulsed electric fields on mass transfer during osmotic dehydration of sea bass fillets. *Food and Bioproducts Processing*, 121, 186-192.
- Sette, P., Salvatori D. & Schebor C. (2016).** Physical and mechanical properties of raspberries subjected to osmotic dehydration and further dehydration by air and freeze-drying, *Food and Bioproducts Processing*, 100, 156-171.
- Shamsi K. (2008).** Effects of Pulsed Electric Field Processing on Microbial, Enzymatic and Physical Attributes of Milk and the Rennet-Induced Milk Gels. School of Applied Sciences College of Science, *Engineering and Technology*, RMIT University, 176.
- Sharma G. P. & Prasad S. (2001).** Drying of garlic (*Allium sativum* L.) cloves by microwave-hot air combination. *Journal of Food Engineering*, 50, 99-105.
- Sharma G. P. & Prasad S. (2006).** Optimization of process parameters for microwave drying of garlic cloves. *Journal of Food Engineering*, 75, 441-446.
- Sharma G. P., Prasad S. & Chahar V. K. (2009).** Moisture transport in garlic cloves undergoing microwave-convective drying. *Food and Bioproducts Processing*, 87, 11-16.
- Sharma G.P. & Suresh P. (2001).** Drying of garlic (*Allium sativum* L.) cloves by microwave-hot air combination. *Journal of Food Engineering*, V 50, 2, 99-105.
- Sharma G.P., Verma R.C. & Pathare P.B. (2005).** Thin layer infrared radiation drying of onion slices. *J Food Eng.* 67,361-366.
- Sharma M. & Dash K. K. (2019).** Effect of ultrasonic vacuum pretreatment on mass transfer kinetics during osmotic dehydration of black jamun fruit. *Ultrason Sonochem*, 58, 104693.
- Sharma P., Sharma S. R., Dhall R. K., Mittal T. C. & Bhatia S. (2020).** Physio-chemical behavior of  $\gamma$ -irradiated garlic bulbs under ambient storage conditions. *Journal of Stored Products Research*, 87, 101-629.
- Shringi V., Kothari S. & Panwar N. L. (2014).** Experimental investigation of drying of garlic clove in solar dryer using phase change material as energy storage. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 118, 533-539.

## References Bibliographies

---

- Shynkaryk M., Lebovka N. & Vorobiev E. (2008).** Pulsed electric fields and temperature effects on drying and rehydration of red beetroots. *Drying Technology*, 26, 695–704.
- Siddiqui, M. F., Ahmed A. & Bano B. (2017).** Insight into the biochemical, kinetic and spectroscopic characterization of garlic (*Allium sativum*) phytochemical: Implication for cardiovascular disease. *Int J Biol Macromol*, 95, 734-742.
- Silva, M. A. d. C., Silva Z. E. d., Mariani V. C. & Darche S. (2012).** Mass transfer during the osmotic dehydration of West Indian cherry, *LWT – Food Science and Technology*, 45, 246-252.
- Singh A., Nair G. R., Rahimi J., Garipey Y. & Raghavan V. (2013).** Effect of Static High Electric Field Pre-Treatment on Microwave-Assisted Drying of Potato Slices. *Drying Technology*, 31, 1960-1968.
- Singh, B., Kumar A. & Gupta A. K. (2007).** Study of mass transfer kinetics and effective diffusivity during osmotic dehydration of carrot cubes, *Journal of Food Engineering*, 79, 471-480.
- Sinha, A. & A. Bhargav (2020).** Effect of state transition, drying kinetics and moisture content on Young's modulus variation during thermal drying of hygroscopic food materials. *Journal of Food Engineering*, 279.
- Sledz M., Wiktor A., Rybak K., Nowacka M., & Witrowa-Rajchert D. (2016).** The impact of ultrasound and steam blanching pre-treatments on the drying kinetics, energy consumption and selected properties of parsley leaves. *Applied Acoustics*, 103, 148-156.
- Sobrino-Lopez A. & Martin-Belloso O. (2010).** Review: potential of highintensity pulsed electric field technology for milk processing. *Food Engineering Reviews*, 2 (1), 17-27.
- Sotelo K. A. G., Hamid N., Oey I., Pook C., Gutierrez-Maddox N., Ma Q., Ying Leong S. & Lu J. (2018).** Red cherries (*Prunus avium* var. Stella) processed by pulsed electric field - Physical, chemical and microbiological analyses. *Food Chem*, 240, 926-934.
- Souza, J. S., Medeiros M. F. D., Magalhães M. M. A., Rodrigues S. & Fernandes F. A. N. (2007).** Optimization of osmotic dehydration of tomatoes in a ternary system followed by air-drying, *Journal of Food Engineering*, 83, 501-509.
- Sowmya N., Vijayakumar P. (2020).** On the applications of ultrasound in food processing: A review. *Materials Today: Proceedings*.
- Ste, N., C. Del Pero & F. Leonforte (2017).** Active refrigeration technologies for food preservation in humanitarian context – A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 22, 150-160.
- Stonehouse G.G. & Evans J.A. (2015).** The use of supercooling for fresh foods: a review. *J. Food Eng.* 148, 74-79.
- Strumillo C. & Kudra T. (1986).** Drying: Principles, Applications, and Design. CRC Press.
- Süfer Ö. & Palazoğlu T. K. (2019).** A study on hot-air drying of pomegranate. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*.



## References Bibliographies

---

- Suleria H. A. R., Butt M. S., Khalid N., Sultan S., Raza A., Aleem M. & Abbas M. (2015).** Garlic (*Allium sativum* L.): diet based therapy of 21st century—a review. *Asian Pacific Journal of Tropical Disease*, 5, 271-278.
- Sun D., Pan T.T., Pu H.B., Zhu Z.W. & Han Z. (2019).** Multi-temperature-region icetemperature fresh keeping storehouse and fresh keeping method for bergamot pears. *U.S. Patent Application*, No.16/324, 586.
- Sun X., Zhu S., Li N., Cheng Y., Zhao J., Qiao X., Lu L., Liu S., Wang Y., Liu C., Li B., Guo W., Gao S., Yang Z., Li F., Zeng Z., Tang Q., Pan Y., Guan M., Zhao J., Lu X., Meng H., Han Z., Gao C., Jiang W., Zhao X., Tian S., Su J., Cheng Z. & Liu T. (2020).** A Chromosome-Level Genome Assembly of Garlic (*Allium sativum*) Provides Insights into Genome Evolution and Allicin Biosynthesis. *Molecular Plant*, 13, 1328-1339.
- Sutar, P. P. & Gupta D. K. (2007).** Mathematical modeling of mass transfer in osmotic dehydration of onion slices, *Journal of Food Engineering*, 78, 90-97.
- Syu K.-Y., Lin C.-L., Huang H.-C. & Lin J.-K. (2008).** Determination of theanine, GABA, and other amino acids in green, Oolong, black, and Pu-erh Teas with dabsylation and high-performance liquid chromatography, *J. Agric. Food Chem.* 56, 7637–7643.
- Szadzińska J., Lechtańska J. & Kowalski S.J. (2015).** Microwave and ultrasonic assisted convective drying of green Pepper: Drying kinetics and quality. Proceedings of the 5th european drying conference (Eurodrying'2015), 391-398.
- Szadzinska J., Lechtanska J., Kowalski S. J. & Stasiak M. (2017).** The effect of high power airborne ultrasound and microwaves on convective drying effectiveness and quality of green pepper. *Ultrason Sonochem*, 34, 531-539.
- Taner Baysal, Filiz Icier, Seda E. & Hasan Y. (2003).** Effects of microwave and infrared drying on the quality of carrot and garlic. *Eur Food Res Technol.* 218, 68-73.
- Tao Y., Wang P., Wang Y., Kadam S. U., Han Y., Wang J. & Zhou J. (2016).** Power ultrasound as a pretreatment to convective drying of mulberry (*Morus alba* L.) leaves: Impact on drying kinetics and selected quality properties. *Ultrason Sonochem*, 31, 310-8.
- Tao Y., Zhang J. , Jiang S., Xu Y., Show P.L. & Han Y. (2018).** Contacting the hot air convection drying by ultrasound of the garlic slices: mass transfer modeling and quality evaluation. *Journal of Food Engineering*, 235, 79-78.
- Tao Y., Zhang Z. & Sun D.-W. (2014).** Experimental and modeling studies of ultrasound assisted release of phenolics from oak chips into model wine, *Ultrason.Sonochem.* 21, 1461–1469.
- Teixeira A.S., Elena González-Benito M. & Molina-García A.D. (2013).** Glassy state and cryopreservation of mint shoot tips. *Biotechnol. Progr.* 29, 707-717.
- Tekle E., Oubrahim H., Dzekunov S.M., Kolb J.F., Schoenbach K.H. & Chock P.B., (2005).** Selective field effects on intracellular vacuoles and vesicle membranes with nanosecond electric pulses. *Biophys. J.* 89 (1), 274-284.

## References Bibliographies

---

- Telfser A. & Galindo F.G. (2019).** Effect of reversible permeabilization in combination with different drying methods on the structure and sensorial quality of dried basil (*Ocimum basilicum* L.) leaves. *LWT*, 99, 148-155.
- Thinh N.Q., Iwamura K., Shrestha R., Fukumoto S., Takematsu R., Yamaguchi J., Kimura K., Tanimizu Y., Sugimura N. (2016).** A study on supercooling processes of leaf lettuces produced in plant factory. In: 2016 International Symposium on Flexible Automation (ISFA), Cleveland, Ohio, USA.
- Thuan B. (2009).** Déshydratation osmotique de la tomate: étude de la rétention des antioxydants et amélioration du procédé. *thèse de philosophie Doctor(Ph.d.)*. universitélaval., Québec. 206.
- Thuwapanichayanan, R., Prachayawarakorn S. & Soponronnarit S. (2014).** Heat and moisture transport behaviour and quality of chopped garlic undergoing different drying methods, *Journal of Food Engineering*, 136, 34-41.
- Tian Z. M., Wan M. X., Wang S. P. & Kang J. Q. (2004).** Effects of ultrasound and additives on the function and structure of trypsin. *Ultrasonics Sonochemistry*, 11, 399-404.
- Tilahun S.W., Vijaya Raghavan & Gariepy Y. (2011).** Microwave Assisted Hot Air Ventilation Drying of Tomato Slices. *International Conference on Food Engineering and Biotechnology*, 9.
- Tiwari B.K., O'Donnell C.P. & Cullen P.J. (2009).** Effect of sonication on retention of anthocyanins in blackberry juice. *J. Food Eng.* 93, 166–171.
- Tiwari B.K., Patras A., Brunton N., Cullen P.J. & O'Donnell C.P. (2010).** Effect of ultrasound processing on anthocyanins and color of red grape juice. *Ultrason. Sonochem.* 17 (3), 598-604.
- Toğrul İ.T. & Pehlivan D. (2002).** Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers. *J Food Eng*, 55, 209–216.
- Toledano-Medina, M. A., Perez-Aparicio J., Moreno-Rojas R. & Merinas-Amo T. (2016).** Evolution of some physicochemical and antioxidant properties of black garlic whole bulbs and peeled cloves. *Food Chem*, 199, 135-139.
- Traffano-Schiffo, M. V., Laghi L., Castro-Giraldez M., Tylewicz U., Rocculi P., Ragni L., Dalla Rosa M. & Fito P. J. (2017).** Osmotic dehydration of organic kiwifruit pre-treated by pulsed electric fields and monitored by NMR, *Food Chem*, 236, 87-93.
- Tulek Y. (2011).** Drying kinetics of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) in a convective hot air dryer. *J. Agric. Sci. Technol.* 13, 655-664.
- Tylewicz U., Tappi S., Mannozi C., Romani S., Dellarosa N., Laghi L., Ragni L., Rocculi P. & Dalla Rosa M. (2017).** Effect of pulsed electric field (PEF) pretreatment coupled with osmotic dehydration on physico-chemical characteristics of organic strawberries. *J. Food Eng.* 213, 219.
- Urszula Tylewicz, Kemal Aganovic , Marianna Vannini, Stefan Toepfl, Villiam Bortolotti, Marco Dalla Rosa, Indrawati Oey & Volker Heinz (2016).** Effect of pulsed electric

## References Bibliographies

---

- field treatment on water distribution of freeze-dried apple tissue evaluated with DSC and TD-NMR techniques. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 37, 352-358
- Vallverdú-Queralt A., Oms-Oliu G., Odriozola-Serrano I., Lamuela-Raventós R. M., Martín-Belloso O. & Elez-Martínez P. (2013).** Metabolite profiling of phenolic and carotenoid contents in tomatoes after moderate-intensity pulsed electric field treatments. *Food Chemistry*, 136(1), 199-205.
- Velickova E., Tylewicz U., Dalla Rosa M., Winkelhausen E., Kuzmanova S. & 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.
- Velickova E., Tylewicz U., Dalla Rosa M., Winkelhausen E., Kuzmanova S. & Gomez Galindo F. (2013a).** Effect of vacuum infused cryoprotectants on the freezing tolerance of strawberry tissues. *LWT - Food Sci. Technol.* 52, 146-150.
- Vemuri, S. K., Banala R. R., Subbaiah G. P. V., Srivastava S. K., Reddy A. V. G. & Malarvili T. (2017).** Anti-cancer potential of a mix of natural extracts of turmeric, ginger and garlic: A cell-based study. *Egyptian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4, 332-344.
- Vieira da Silva Júnior E., Lins de Melo L., Batista de Medeiros R. A., Pimenta Barros Z. M. & Azoubel P. M. (2018).** Influence of ultrasound and vacuum assisted drying on papaya quality parameters. *Lwt*, 97, 317-322.
- Vorobiev E. & Lebovka N. (2010).** Enhanced extraction from solids foods and biosuspensions by pulse electrical energy. *Food Engineering Reviews*, 2, 95-108.
- Wang C. & Singh R. P. (1978).** use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. *Paper-American Society of Agricultural Engineers*.
- Wang H., Zhao Q.S., Wang X.D., Hong Z.D. & Zhao B. (2019).** Pretreatment of ultrasound combined vacuum enhances the convective drying efficiency and physicochemical properties of okra (*Abelmoschus esculentus*). *Lwt*, 112.
- Wang Y., Li X., Chen X., Li B., Mao X., Miao J., Zhao C., Huang L. & Gao W. (2018).** Effects of hot air and microwave-assisted drying on drying kinetics, physicochemical properties, and energy consumption of chrysanthemum. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 129, 84-94.
- Wiktor A., Iwaniuk M., Sledz M., Nowacka M., Chudoba T. & Witrowa-Rajchert D. (2013).** Drying kinetics of apple tissue treated by pulsed electric field. *Drying Technol.* 31 (1), 112-119.
- Wiktor A., Śledź M., Nowacka M., Chudoba T. & Witrowa-Rajchert D. (2014).** Pulsed electric field pretreatment for osmotic dehydration of apple tissue: Experimental and mathematical modeling studies. *Drying Technology*, 32(4), 408-417.
- Wiktor A., Sledz M., Nowacka M., Rybak K., Chudoba T., Lojkowski W. & D. Witrowa-Rajchert (2015).** The impact of pulsed electric field treatment on selected bioactive compound content and color of plant tissue. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 30, 69-78.

## References Bibliographies

---

- Wiktor A., Sledz M., Nowacka M., Chudoba T. & Wiktrowa-Rajchert D. (2014).** Pulsed electric field pretreatment for osmotic dehydration of apple tissue: Experimental and mathematical modeling studies. *Drying Technology*, 32, 408-417.
- Witrowa-Rajchert D., Wiktor A., Sledz M. & Nowacka M. (2014).** Selection of emerging technologies to improve the drying process. *Drying technology*, 32, 1386-1396.
- Won Y., Min S.C. & Lee D. (2015).** Accelerated drying and improved color properties of red pepper by pre-treatment of pulsed electric fields. *Sec. Technol.*, 33, 926-932.
- Wong, E. H. (2017).** Characterizing the kinetics of free and bound water using a non isothermal sorption technique. *Drying Technology*, 35(1), 46–54.
- Wu Y. & Zhang D. (2014).** Effect of pulsed electric field on freeze-drying of potato tissue. *International Journal of Food Engineering*, 10 (4), 857-862.
- Wu, M. Zhang, Z. Q. Li (2019).** Influence of infrared drying on the drying kinetics, bioactive compounds and flavor of *Cordyceps militaris*. *LWT-Food Science and Technology*, 111 , 790-798,
- Xiong, X. J., Wang P. Q., Li S. J., Li X. K., Zhang Y. Q. & Wang J. (2015).** Garlic for hypertension: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Phytomedicine*, 22 , 352-61.
- Xiuxiu T., Min Z. & Sakamon D. (2015).** New developments on ultrasound-assisted processing and flavor detection of spices: A review. *Ultrasonics – Sonochemistry*, 55, 297-307.
- Y.-Y. Jia, I. Khalifa, L.-L. Hu, W. Zhu, J. Li, K.-K. Li, C.-M. Li (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 Bioproducts Processing*, 118, 67-76.
- Yang N., Huang K., Lyu C. et Wang J. (2016).** Pulsed electric field technology in the manufacturing processes of wine, beer, and rice wine: A review. *Food Control*, 61, 28-38.
- Yangyang J., Ibrahim K., Lanlan H., Wei Z., Jin L.,Kaikai L. & Chunmei L. (2019).** Influence of three different drying techniques onpersimmon chips’ characteristics: A comparisonstudy among hot-air, combined hot-air-microwave,and vacuum-freeze drying techniques. *Food and Bioproducts Processing*, 118, 67-76.
- Yong C.-L. (2006).** The antioxidant properties of garlic compounds: allyl cysteine, alliin, allicin, and allyl disulfide. *Journal of Medicinal Food*, 9(2), 205-213.
- Youji O., Kaoru T., Eisuke S. & Haruo O. (2006).** Kinetic and mechanistic studies of allicin as an antioxidant. *Organic and Biomolecular Chemistry*, 4(22), 4113-4117.
- Younis M., Diaeldin A.k. & Assem Z. E. (2018).** Kinetics and mathematical modeling of infrared thin-layer drying of garlic slices. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 25, 332–338.
- Yu Y., Jin T. Z., Fan X. & Wu J. (2018).** Biochemical degradation and physical migration of polyphenolic compounds in osmotic dehydrated blueberries with pulsed electric field and thermal pretreatments. *Food Chem*, 239, 1219-1225.

## References Bibliographies

---

- Zárate-Rodríguez E., Ortega-rivas E. & Barbosa-Cánovas G.V. (2000).** Quality changes in applejuice as related to nonthermal processing. *J. Food Qual.*, 23, 337-349.
- Zenoozian M. S., Feng H., Razavi S., Shahidi F. & 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.
- Zhang B., Zeng X.A., Sun D.W., Yu S.J., Yang M.F. & Ma S. (2012).** Effect of electric field treatments on brandy aging in oak barrels. *Food Bioprocess Technol.* 7, 1- 9.
- Zhang F., Zhang M. & Mujumdar A. (2011).** Drying characteristics and quality of restructured wild cabbage chips processed using different drying methods. *Dry. Technol.* 29, 682-688.
- Zhang Q. H., Qin B. L., Barbosa-Canovas G. V., Swanson B. G. & Pedrow P. D. (1996).** Batch mode fortreatment using pulsed electric fields, *US Patent* 5, 541,549.
- Zhang Y., Liu X., Ruan J., Zhuang X., Zhang X. & Li Z. (2020).** Phytochemicals of garlic: Promising candidates for cancer therapy. *Biomed Pharmacother*, 123, 109730.
- Zhao H., Wang B., Cui K., Cao J. & Jiang W. (2019).** Improving postharvest quality and antioxidant capacity of sweet cherry fruit by storage at near-freezing temperature. *Scientia Horticulturae*, 246, 68-78.
- Zhao W., Yang R., Lu R., Wang M., Qian P. & Yang W. (2008).** Effect of PEF on microbial inactivation and physical–chemical properties of green tea extracts. *LWT—Food Science and Technology*, 41(3), 425-431.
- Zielinska M. & Markowski M. (2010).** Air drying characteristics and moisture diffusivity of carrots. *Chem. Eng. Process. Process Intensif.* 49, 212-218.
- Zielinska M. & Michalska A. (2016).** Microwave-assisted drying of blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) fruits: drying kinetics, phenolics, anthocyanins, antioxidant capacity, colour and texture, *Food Chem.* 212, 671-680.
- Zita Essan Bla N’GORAN, Sadat AW, Emmanuel Nogbou ASSIDJO & Patrice KOUAME, (2012).** Etude de l’influence des paramètres de la déshydratation osmotique sur la perte en eau des fruits tropicaux: essais avec la papaye (*Carica papaya*) et la mangue (*Mangifera indica*), *Journal of Applied Biosciences*, 59, 4330– 4339.
- Zogzas N.P., Maroulis Z.B. & Marinos-Kouris D. (1996).** Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. *Dry Technol*, 14, 2225-2253.

## Résumé

L'objectif principal de cette étude était d'explorer les influences des prétraitements sur l'amélioration des différentes méthodes de conservation de l'*Allium sativum* L., El-Hamra.

Afin de préserver l'ail, et améliorer sa qualité sensorielle et nutritionnelle, l'effet des prétraitements par Champ électrique pulsé, déshydratation osmotique et ultrason a été étudié sur le mécanisme de séchage (séchage à l'air chaud et séchage par microonde assisté à l'air chaud) et propriétés physicochimiques de l'ail.

Les résultats ont montré que l'utilisation d'un prétraitement par ultrason avant le séchage de l'ail par microonde assisté à l'air chaud donnait de meilleurs résultats dans les caractéristiques de séchage tel que la diminution du temps de séchage, augmentation coefficient de diffusion et l'énergie d'activation ; et les attributs de qualité de l'ail (la teneur en phénols totaux, activité antioxydant, la dureté et la couleur).

La conservation au froid permet prolonger la durée de conservation ; l'efficacité de prétraitement par CEP et les techniques de conservation par froids sur les propriétés physico-chimiques de l'ail (*Allium sativum* L.) ont été étudiés. Ils nous permettent de retenir que congélation (-18°C) et la sur refroidissement (-7°C) sont recommandés pour une meilleure conservation de l'ail par froid. Cependant la durée de conservation varie de 3 à 6 mois.

Les résultats peuvent enrichir les connaissances fondamentales sur les changements chimiques survenus pendant la conservation par froid et la déshydratation de l'ail, et fournir un aperçu pour la conservation.

**Mots clé:** Ail, Conservation, Prétraitements, Séchage, Conservation par froid.

## Abstract

The main objective of this study was to explore the influences of pretreatments on the improvement of different preservation methods of *Allium sativum* L., El-Hamra.

In order to preserve garlic, and improve its sensory and nutritional quality, the effect of pulsed electric field, osmotic dehydration and ultrasound pretreatments was studied on the drying mechanism (hot air drying and microwave assisted drying. hot air) and the physicochemical properties of garlic.

The results showed that the use of an ultrasonic pretreatment before drying the garlic by microwave assisted with hot air gave better results in the drying characteristics such as decrease in drying time, increase coefficient of diffusion and activation energy; and the quality attributes of garlic (total phenol content, antioxidant activity, hardness and color).

Cold storage helps extend shelf life; the efficacy of CEP pretreatment and cold storage techniques on the physicochemical properties of garlic (*Allium sativum* L.) were studied. They allow us to remember that freezing (-18 ° C) and supercooling (-7 ° C) are recommended for better preservation of garlic in the cold. However, the shelf life varies from 3 to 6 months.

The results can enrich fundamental knowledge about the chemical changes that have occurred during cold storage and dehydration of garlic, and provide insight for storage.

## ملخص

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو استكشاف تأثير المعالجات المسبقة على تحسين طرق الحفظ المختلفة لثوم والمعالجات من أجل الحفاظ على الثوم ، وتحسين جودته الحسية والغذائية ، تمت دراسة تأثير المجال الكهربائي النبضي ، والتجفيف الازموزي الموجات فوق الصوتية على عملية التجفيف (التجفيف بالهواء الساخن والتجفيف الميكروويف بمساعدة الهواء الساخن) والخصائص الفيزيائية والكيميائية للثوم.

أظهرت النتائج أن استخدام المعالجة بالموجات فوق الصوتية قبل تجفيف الثوم بواسطة الميكروويف بمساعدة الهواء الساخن أعطت نتائج أفضل في خصائص التجفيف مثل تقليل وقت التجفيف ، وزيادة معامل طاقة الانتشار والتفعيل ؛ وخصائص جودة الثوم (محتوى الفينول الكلي) ، النشاط المضاد للأكسدة ، الصلابة واللون.

وتقنيات التخزين البارد على المجال الكهربائي النبضي يساعد التخزين البارد على إطالة العمر الافتراضي ؛ تمت دراسة فعالية المعالجة إنها تسمح لنا بتذكر أن التجميد (-18 درجة مئوية) والتبريد الفائق (-7 درجة). ومع ذلك ، تتراوح مدة الصلاحية من 3 إلى 6 أشهر.

يمكن أن تنثري النتائج المعرفة الأساسية حول التغيرات الكيميائية التي حدثت أثناء التخزين البارد وجفاف الثوم ، وتوفر نظرة ثاقبة للتخزين

**الكلمات المفتاحية:** الثوم ، حفظ ، معالجة مسبقة ، تجفيف ، حفظ بارد