

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de Blida I



Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département d'Agro-alimentaire

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Agro-Alimentaire et Contrôle de Qualité

Filière : Sciences Alimentaires

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Thème

Conservation de la tomate par déshydratation

Présenté par :

Mr. KERIKECH Benaissa Yasser

Mr. SELLOUM Khellil

Soutenance le 02/09/2020 devant le jury composé de :

Président Mr. MEGATELI S.

Pr à l'Université Blida 1

Examineur Mr. BOUGHERRA F.

MCB à l'Université Blida 1

Promotrice Mme. AIT CHAUCHE FS.

MCB à l'Université Blida 1

Année Universitaire 2019-2020

Remerciements

Nous adressons tout d'abord, nos profonds remerciements et louanges à Allah le tout puissant, qui nous a guidé sur le droit chemin et donné le courage et la volonté d'achever ce modeste travail.

*Nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance et notre profond respect à notre promotrice, Madame **AIT CHAUCHE FS.**, Maître de conférences B à l'Université de Blida 1, pour son sérieux, sa patience, sa rigueur scientifique, ses précieux conseils et l'orientation qui nous ont permis d'enrichir nos connaissances et de réaliser un travail convenable.*

*Nous tenons aussi à remercier Monsieur **MEGATELI S.**, Professeur et Chef du Département Agro-alimentaire à l'Université de Blida 1, d'avoir accepté d'honorer la présidence du jury, et pour ses encouragements et ses précieux conseils durant la période de ce travail,.*

*Nous exprimons toute notre gratitude à Monsieur **BOUGHERRA F.**, Maître de conférences B à l'Université de Blida 1, pour avoir bien voulu examiner ce travail et être membre du jury.*

*Nous remercions chaleureusement Monsieur **FERRADJI A.**, Professeur à l'Ecole Nationale supérieure Agronomique, pour notre accueil au sein de son laboratoire, son aide précieuse, sa confiance et ses conseils.*

Dédicaces

Je dédie cet ouvrage

À mes parents Samira et Mourad qui m'ont soutenu et encouragé durant ces années d'études.

À mes frères Adem, Abdelmalek, Israa, Nesrine, Sondous, mes grands-parents Zineb et Alaa et Ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.

À ma famille, mes proches et à ce qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

À tous mes amis : Omar, Kamid, Islam, Youcef, Mohamed, Yacine et Ahmed qui m'ont toujours encouragé, et à qui souhaite plus de succès.

À mon ami et binôme Yasser et à toute sa famille, je lui souhaite plus de succès.

À toute la promotion Agroalimentaire et contrôle de qualité 2020.

Khellil.

Dédicaces

C'est avec un très grand honneur et un immense sentiment de joie et de bonheur que je dédie ce modeste travail à :

À mes chères parents Kassen et Zahia ;

Mes frères : Mohamed amine et Moncef ;

Mon unique sœur : Imene ;

Pour leur amour, leur affection, leur compréhension, leur soutien, leur encouragement et leur présence.

Mes Grand-mères : Zohor et Fouzia pour leur encouragement ;

Mon Grand-père Mohamed et la mémoire de mon défunt Grand-père Benaïssa ;

Mon oncle Benaceur, Mes Tantes Anissa, F/Zohra et Kadjer pour leur soutien et encouragement ;

Tous mes amis(es).

Mon amie et binôme Khalil, pour tous ces efforts et son sérieux.

Toute la promotion 2020/corona.

Benaïssa yasser

Résumé

La tomate (*Solanum Lycopersicum L*) est l'un des aliments les plus riches en eau (91%). Cette forte teneur en eau favorise la croissance de nombreux microorganismes, ce qui rend cette denrée extrêmement périssable. La déshydratation est une méthode de conservation ancienne mais efficace pour l'empêchement de la prolifération microbienne par la diminution de l'activité de l'eau du produit. Cependant, le procédé de séchage reste énergétiquement couteux. Aussi, les températures élevées et le temps le plus long entraînent une perte de certains nutriments. Le séchage tend à augmenter la durée de conservation d'un aliment, tout en préservant sa qualité nutritionnelle par l'élimination de l'humidité dans un produit jusqu'à une valeur constante. Donc, prétraiter les produits avant leur séchage est l'une des solutions suggérées. La déshydratation osmotique partielle est un meilleur processus pour diminuer le temps et la température du séchage et au même temps d'améliorer la qualité des produits séchés. Cette étude a pour objectif principal de prolonger la durée de conservation de la tomate de la variété *Agora* par couplage entre la déshydratation osmotique et le séchage convectif. Afin d'évaluer l'effet de la température et de la durée de séchage sur la perte en eau de la tomate, la méthodologie des surfaces de réponse, conçue à partir d'un plan expérimental composite centré, est appliquée pour l'optimisation du procédé de séchage. Sur la base des travaux antérieurs sur le séchage, Les valeurs des réponses ainsi obtenues étaient un temps de séchage de 42 h, une perte en poids de la tomate égale à 96.71% et une teneur finale en eau de 14.51%.

Mots clés : Tomate, conservation, déshydratation osmotique, séchage, optimisation, méthodologie des surfaces de réponses.

Abstract

Tomato (*Solanum Lycopersicum L*) is one of the foods with the highest water content (91%). This high water content promotes the growth of many microorganisms, which makes this food extremely perishable. Dehydration is an old but effective preservation method for preventing microbial growth by decreasing the water activity of the product. However, the drying process remains costly in terms of energy. Also, the high temperatures and the longer time cause loss of certain nutrients. Drying tends to increase the shelf life of a food, while maintaining its nutritional quality by removing moisture in a product to a constant value. So, pretreating the products before they dry is one of the suggested solutions. Partial osmotic dehydration is a better process to decrease the time and temperature of drying and at the same time improve the quality of the dried products. The main objective of this study is to extend the shelf life of tomatoes of the *Agora* variety by coupling between osmotic dehydration and convective drying. In order to assess the effect of temperature and drying time on tomato water loss, the response surfaces methodology, designed from a centered composite experimental design, is applied for the optimization of drying process. Based on previous work on drying, the response values thus obtained were a drying time of 42 h, a tomato weight loss equal to 96.71% and a final water content of 14.51%.

Keywords: Tomato, conservation, osmotic dehydration, drying, optimization, methodology of response surfaces.

الملخص

الطماطم (*Solanum Lycopersicum L*) من الأطعمة التي تحتوي على أعلى نسبة مائية (91%). هذا المحتوى المائي العالي يعزز نمو العديد من الكائنات الحية الدقيقة ، مما يجعل هذا الطعام شديد التلف. الجفاف هو طريقة حفظ قديمة وفعالة لمنع نمو الميكروبات عن طريق تقليل النشاط المائي للمنتج. ومع ذلك، تظل عملية التجفيف مكلفة من حيث الطاقة. كما أن درجات الحرارة المرتفعة والوقت الأطول يتسببان في فقدان بعض العناصر الغذائية. يميل التجفيف إلى زيادة العمر الافتراضي للطعام، مع الحفاظ على جودتها الغذائية عن طريق إزالة الرطوبة في المنتج إلى قيمة ثابتة. لذا ، فإن المعالجة المسبقة للمنتجات قبل أن تجف هي أحد الحلول المقترحة. يعتبر التجفيف الاسموزي الجزئي عملية أفضل لتقليل وقت ودرجة حرارة التجفيف وفي نفس الوقت تحسين جودة المنتجات المجففة. الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو إطالة العمر الافتراضي للطماطم من صنف *Agora* عن طريق الاقتران بين الجفاف الاسموزي والتجفيف بالحمل الحراري. من أجل تقييم تأثير درجة الحرارة ووقت التجفيف على فقد ماء الطماطم ، يتم تطبيق منهجية أسطح الاستجابة ، المصممة من تصميم تجريبي مركب مركزي ، لتحسين عملية التجفيف. بناءً على الاعمال السابقة على التجفيف، كانت قيم الاستجابة التي تم الحصول عليها هي وقت التجفيف 42 ساعة، وفقدان وزن الطماطم بنسبة 96.71% و محتوى الماء النهائي 14.51%.

الكلمات الدالة: الطماطم ، الحفظ ، الجفاف الاسموزي ، التجفيف ، التحسين ، منهجية أسطح الاستجابة

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction1

Chapitre 1: Généralités sur la tomate

1.1.	Histoire de la tomate	4
1.2.	Définition	5
1.3.	Taxonomie.....	5
1.4.	Description botanique	6
1.5.	Les variétés de tomate.....	7
1.5.1.	Les variétés à port indéterminé.....	7
1.5.2.	Les variétés à port déterminé.....	7
1.6.	La composition de la tomate	8
1.6.1.	Eau	8
1.6.2.	Sucre	8
1.6.3.	Protéines	8
1.6.4.	Lipides.....	8
1.6.5.	Vitamines	8
1.6.6.	Fibres.....	9
1.6.7.	Minéraux	9
1.6.8.	Composition en antioxydants de la tomate	10
1.6.8.1.	Caroténoïdes	10
1.6.8.2.	Composés phénoliques.....	10
1.7.	Écophysiologie et facteurs de l'environnement	10
1.7.1.	Température.....	10
1.7.2.	Lumière	11
1.7.3.	Hygrométrie.....	11
1.7.4.	Alimentation en eau	12
1.7.5.	Sol.....	12
1.7.6.	Nutrition minérale.....	12
1.8.	La production de tomate fraîche	13

1.8.1.	Principaux pays producteurs de la tomate dans le monde.....	13
1.8.2.	Production de la tomate en Algérie.....	14
1.9.	Importance de la tomate	16
1.9.1.	Importance économique et production actuelle.....	16
1.9.2.	Importance médicinale	16

Chapitre 2: DESHYDRATATION OSMOTIQUE PARTIELLE

2.1.	Définitions	17
2.2.	Principe	18
2.3.	Cinétique de la déshydratation osmotique	18
2.4.	Principaux facteurs influençant la cinétique de la déshydratation osmotique	20
2.4.1.	Propriétés des tissus biologiques	20
2.4.2.	Concentration de la solution osmotique.....	20
2.4.3.	Température de la solution osmotique	21
2.4.4.	Durée de traitement.....	21
2.5.	Applications de la déshydratation osmotique.....	22
2.5.1.	Prétraitement thermique	22
2.5.1.1.	Le blanchiment	22
2.5.1.2.	Congélation	23
2.5.2.	Stabilisation des produits déshydratés osmotiquement par des traitements physiques	23
2.5.2.1.	Séchage	23
2.5.2.2.	Congélation	24
2.6.	Valorisation des fruits conservés en solution sucrées	25
2.7.	Qualité des produits déshydratés et séchés.....	25
2.8.	Importance du couplage déshydratation osmotique-séchage	26
2.9.	Des exemples sur la déshydratation osmotique de la tomate.....	27

CHAPITRE 3:Séchage

3.1.	Définition du séchage.....	30
3.2.	Principe de séchage.....	30
3.3.	Objectif de séchage	31
3.4.	Mode d'apport de la chaleur	32
3.5.	Le choix du procédé de séchage	32
3.6.	Méthodes de séchage	33

3.6.1.	Séchage par ébullition.....	33
3.6.2.	Séchage à l'air libre.....	33
3.6.3.	Séchage par micro-onde.....	33
3.6.4.	Séchage à l'étuve.....	34
3.6.5.	Séchage par entraînement.....	34
3.6.5.1.	Activité de l'eau dans un produit.....	34
3.6.5.2.	Définition La teneur en eau.....	36
3.6.5.3.	Isothermes de sorption.....	36
3.7.	Stabilité des produits biologiques.....	37
3.8.	Mécanismes d'élimination de l'eau.....	38
3.8.1.	Principe.....	39
3.9.	Cinétique de séchage.....	39
3.9.1.	Périodes de séchage.....	40
3.9.2.	Influence de paramètre de l'air sur la cinétique de séchage.....	42
3.9.2.1.	Influence de la température de l'air.....	42
3.9.2.2.	Influence de l'humidité de l'air.....	42
3.9.2.3.	Influence de la vitesse de l'air.....	42
3.10.	Qualité des produits séchés.....	42
3.11.	Types de séchoirs alimentaires.....	43
3.12.	La modélisation du processus de séchage.....	46
3.12.1	La méthode des plans d'expériences (MPE).....	46
3.12.2	La méthodologie des surfaces de réponse.....	46
3.12.3	Les étapes de la MSR.....	47
3.12.4	Exemples d'application de la méthodologie des surfaces de réponses.....	48
	Conclusion.....	52
	Références bibliographiques.....	53
	Annexe.....	68

Liste des figures

Figure 1: Structure de fruit de la tomate.....	5
Figure 2 : Composition moyenne de la matière sèche du fruit de tomate.....	10
Figure 3 : Principaux pays producteurs de la tomate 2018.....	14
Figure 4 : Production, Rendement et Superficie récoltée de Tomates, fraîches en Algérie de 2010 à 2018.....	15
Figure 5 : Transferts de matière entre la solution et le produit alimentaire.....	18
Figure 6 : Allure générale des isothermes de sorption.....	37
Figure 7 : vitesses de détérioration relative des aliments en fonction de l'activité de l'eau.....	38
Figure 8 : Transfert de chaleur lors de l'évaporation de l'eau.....	39
Figure 9 : Courbes d'évolution type au cours du temps de la teneur en eau du produit (A), l'allure de séchage (B) et l'allure de séchage en fonction du taux d'humidité (C).....	40
Figure 10 : Schémas de quelques types de séchoirs.....	44
Figure 11: (a) tracé de contour 2D, et (b) tracé de surface de réponse 3D.....	48

Liste des tableaux

Tableau 1 : Principaux pays producteurs de la tomate fraiche en 2018.....	13
Tableau 2 : Production, Rendement et Superficie récoltée de Tomates, fraiches en Algérie de 2010 à 2018.....	15
Tableau 3 : Les conditions optimales de la déshydrations osmotique des fruits et des légumes.....	22
Tableau 4 : Caractéristiques techniques et applications des principaux types de séchoirs.....	45

Liste des annexes

Tableau 1 : Application de la déshydratation osmotique sur des fruits et légumes.....	68
--	----

Liste des abréviations

USA : États-Unis d'Amérique.

FAO : Food and Agriculture Organization.

DO : Déshydratation osmotique.

RMN : résonance magnétique nucléaire.

pH : potentiel hydrogène.

A_w : activité de l'eau.

P : pression partielle de la vapeur d'eau dans l'aliment (MPa).

P_e : pression de la vapeur de l'eau pure à la même température (MPa).

HRE : humidité relative d'équilibre en pourcentage (%).

W : la teneur en eau.

W% : la teneur en eau en pourcentage.

E : poids d'eau dans le matériau.

P_s : poids du matériau sec.

P_h : poids matériau humide.

X : teneur en eau de base sèche (Kg/Kg).

T : température (°C).

HR : humidité relative de l'aire en équilibre (%).

T_a : température de l'aire au point considéré (K).

HR_a : humidité relative d'un produit au point considéré (K).

X_{eq} : teneur en eau d'équilibre (Kg/Kg).

n_s : taux d'humidité du produit à sécher (Kg d'eau/Kg de matière anhydre).

t : temps (s).

IAA : industries agroalimentaires.

PAI : produits alimentaires intermédiaires.

MPE : méthode des plans d'expériences.

MSR : méthodologie des surfaces de réponse.

Introduction

Introduction

La tomate (*Solanum Lycopersicum L.*) est l'un des légumes les plus consommés principalement en raison de ses apports en vitamine A sous forme de terpènes caroténoïdes (**Boumendjel et al., 2012**), elle est cultivée sous presque toutes les latitudes (**Manaa et al., 2013**) sur une superficie de 4.7 millions d'hectares avec une production mondiale de 182 millions de tonnes (**FAO, 2018**). La culture de la tomate occupe une place prépondérante dans l'économie agricole algérienne. Selon la FAO, 22323 ha sont consacrés à la culture des tomates en 2018, donnant une production moyenne de 13 millions de quintaux (**FAO, 2018**). Compte tenu de leur importance économique, les tomates font l'objet de nombreuses recherches scientifiques et sont considérées comme l'un des produits agricoles commerciaux les plus utilisés dans le monde (**Khama et al., 2016**). Dans les pays en développement, y compris l'Algérie, la situation est exaspérante, en effet les pertes sont supérieures à 35% en raison de l'insuffisance des installations de stockage, de traitement et de transport. Les tomates produites en haute saison sont soit consommées fraîches, vendues à des prix relativement bas, soit mises au rebut (**Abano et al., 2012**). Le séchage est l'une des méthodes les plus employées pour la conservation des légumes (**Abano et al., 2012**). L'utilisation de tomates séchées est devenue très populaire (**Djebli et al., 2019**), elles sont utilisées dans les salades, les pizzas, les soupes, les saoules et autres plats (**Movagharnejad et Nikzad, 2007**). Plusieurs études ont indiqué que le traitement thermique des tomates, notamment le séchage n'affecte pas de manière significative les niveaux de lycopène (**Kaur et al., 2004**). De plus, le séchage peut augmenter la valeur nutritionnelle des tomates en augmentant leur teneur en lycopène et leur activité antioxydant totale (**Dewanto et al., 2008**). Le poids et le volume finale de la tomate séchée sont fortement réduits après déshydratation (**Celma et al., 2008**), ce qui peut contribuer à une réduction significative des coûts de transport et de stockage (**Abouo et al., 2016. Benkhelfellah et al., 2005**).

Les produits à base de tomates les plus courants sont les conserves et les sauces. Cependant, le nombre de produits à base de tomates déshydratées est limité (**Dermesonlouoglouc et al., 2019**). Les procédés de séchage à l'air ou de séchage au soleil couramment utilisés nuisent à la qualité en raison des températures de traitement élevées, des longs temps de traitement (réactions de dégradation thermique) et des niveaux élevés d'oxygène (réactions d'oxydation) (**Giovanelli et al., 2002**). Pour éviter ces interactions, des prétraitements tels que la déshydratation osmotique doivent être utilisés.

La déshydratation osmotique (DO) est un processus qui permet d'éliminer partiellement l'eau des aliments en les immergeant dans des solutions hypertoniques. La différence de pression osmotique entre l'aliment et la solution environnante donne lieu à deux processus majeurs de transfert de masse simultanés à contre-courant; à savoir, diffusion de l'eau de l'aliment vers la solution et diffusion du soluté de la solution vers l'aliment. Le prétraitement par DO avant le séchage est considéré comme un traitement thermique minimal qui améliore les propriétés nutritionnelles et sensorielles des produits séchés à l'air (**Aminzadeh et al., 2012**). Elle est généralement appliquée à des températures douces comme prétraitement des fruits et légumes (**Amami et al., 2008a ; Chua et al., 2001 ; Correa et al., 2016 ; Heredia et al., 2012**). L'incorporation du soluté osmotique (glucides, sels et autres solutés caractéristiques) dans le tissu alimentaire pendant le traitement osmotique modifie dans une certaine mesure les caractéristiques des aliments frais, y compris les caractéristiques nutritionnelles, organoleptiques et fonctionnelles. Ainsi, le produit déshydraté osmotiquement peut acquérir de nouvelles aptitudes sensorielles et technologiques. Les avantages de l'utilisation de la déshydratation osmotique comme prétraitement qui précède le séchage conventionnel sont d'une part la préservation, voire l'amélioration des caractéristiques composantes de la qualité du produit alimentaire séché à l'air, comme la protection de sa couleur, de sa saveur et de son arôme en raison de l'inhibition des enzymes et d'autre part la réduction de la consommation d'énergie en raison de la diminution du temps de traitement et de la température (**da Costa Ribeiro et al., 2016; Fernandes et al., 2006; Park et al., 2002; Torreggiani, 1993**).

Au cours des quinze dernières années, la méthodologie de surfaces de réponses (RSM) a été largement utilisée pour développer, améliorer et optimiser la transformation des aliments (**Slesinsky et al., 2000; Severini et al., 2004; Yolmen et al., 2014**). Cependant, cette technique est relativement peu appliquée à l'optimisation du procédé de séchage de la tomate (**Abano et al., 2012 ; Correia et al., 2015 ; Malakasa et al., 2019 ; Janghu et al., 2014 ; Coelho et al., 2012 ; Obajemih et al., 2017**).

L'objectif principal de cette étude est de développer des stratégies de séchage de la tomate de la variété *Agora* en utilisant la déshydratation osmotique comme un prétraitement. Aussi, dans le but d'optimiser les paramètres opératoires du procédé de séchage convectif ou par entraînement de la tomate, la méthodologie des surfaces de réponses est appliquée. Le présent travail vise également à atteindre les objectifs spécifiques suivants:

- ✓ Obtenir des tomates séchées ayant des caractéristiques nutritionnelles et organoleptiques semblable à celles des tomates fraîches;
- ✓ Réduire le temps, la température et la consommation d'énergie de l'opération de séchage couplée à la DO par rapport au procédé conventionnel;
- ✓ Organiser au mieux les essais relatifs au procédé de séchage et obtenir un maximum de résultats avec un minimum d'expériences en utilisant la méthodologie des surfaces de réponses.
- ✓ Fournir une base des données riche afin d'améliorer la conservation des aliments;
- ✓ Donner lieu à un plan viable permettant de faciliter le développement de l'opération de séchage d'autres produits alimentaires et ouvrir la voie à des recherches plus approfondies.

La présente étude bibliographique est constituée de trois chapitres. Le premier chapitre est consacré aux généralités sur la tomate notamment sa description botanique, sa composition chimique, ses caractéristiques nutritionnelles et sa production nationale et mondiale.

Le second chapitre est dédié à la déshydratation osmotique partielle utilisée comme un prétraitement avant le séchage et à son importance dans la stabilisation des fruits et légumes.

Dans le troisième chapitre, le séchage des denrées alimentaires proprement dit est présenté. Le principe du séchage et son importance dans la conservation des aliments, les méthodes de séchage notamment le séchage par entraînement et les isothermes de sorption sont énoncés dans ce chapitre. Nous avons également présenté la cinétique de séchage (courbes et périodes) et l'influence des paramètres de l'air chaud sur cette cinétique. Enfin, nous avons réalisé une étude bibliographique approfondie sur les applications de la méthodologie des surfaces de réponses pour l'optimisation du procédé de séchage de la tomate en se basant sur les résultats d'articles scientifiques récents.

Chapitre 1

Généralités sur la tomate

Chapitre 1: Généralités sur la tomate

1.1. Histoire de la tomate

Le mot «Tomate» est une déformation du mot Inca «Tomalt». C'est au Pérou et dans ses environs, vers le XIIème siècle, que naît la tomate qu'est alors pas plus grosse que notre tomate cerise contemporaine. La tomate est d'origine sauvage. Les Incas la cultivent peu à peu dans la région andine. Elle est découverte par les conquérants espagnols en Amérique du Sud au XVIème siècle. **(Doré et Varoquaux, 2006)**. Elle est originaire de la région andine du Nord-Ouest de l'Amérique du Sud où sa domestication remonte à plus de 5000 ans **(Verolet et al., 2001)**.

Cette plante à fruits très petits fut d'abord domestiquée au Mexique et améliorée par les Aztèques. Elle fut d'abord implantée dans le Sud de l'Europe, notamment en Italie. Sa première description fut faite en 1544 par un botaniste italien du nom de Matthioli. Il évoque une tomate jaune qui donnera son nom à la tomate italienne : pomodoro signifiant « pomme d'or » **(Toussaint et al., 2010)**.

La tomate fut rapidement adoptée en cuisine par les pays du Sud et fut introduite en Provence en 1750. Cependant, dans la moitié Nord de la France et le reste de l'Europe en général, on la cultiva tout d'abord comme plante ornementale **(Toussaint et al., 2010)**.

En 1806, un américain affirme que la tomate rehausse le goût des sauces et des potages. Trois ans plus tard, Thomas Jefferson se porte à la défense de ce fruit tentateur. A partir de 1830, on ne parle plus que de tomate. L'offensive médiatique fait tomber les dernières barrières et les éditeurs se lancent dans la publication de livres de recettes, de périodiques horticoles, de chroniques médicales **(Coombe, 1976)**.

A la fin du XIXe siècle, les émigrés européens rapportent les premières tomates améliorées en Amérique, notamment aux Etats-Unis (le ketchup n'aurait donc peut-être jamais existé sans les européens). Commence alors pour la tomate une ère riche en échanges qui mèneront à une grande diversification variétale. C'est ainsi qu'en 1955, les Américains obtinrent la fameuse «Roma ». Aujourd'hui, 9 variétés sauvages existent encore (dont la tomate groseille, assez proche de la tomate cerise)**(Doré et al.,2006)**.

1.2. Définition

La tomate est un fruit mais cultivée et utilisée en tant qu'un légume. Elle est constituée de trois parties : le péricarpe (peau et partie charnue), le gel (contenu dans les loges), et les graines. La peau consiste en trois couches de cellules de type épidermique ou hypodermique. L'épéricarpe est formé par l'épicarpe, le mésocarpe et l'endocarpe. Les graines sont à l'intérieur de la tomate dans les loges.

La tomate est un fruit climactérique : au début de sa maturation, le fruit présente un pic de respiration caractéristique associé à un pic d'éthylène (C_2H_4). Au cours de sa maturation, la tomate change de couleur par la dégradation de la chlorophylle et la mise en place de la voie de biosynthèse des caroténoïdes. Elle va donc passer du vert au blanc, puis au jaune, pour enfin parvenir au rouge à maturité (pour la majorité des variétés). Il est à noter l'existence de variétés qui auront une couleur différentes à maturité (**Degrou, 2013**).

1.3. Taxonomie

Règne : Plantae.

Sous règne : Trachenobionta.

Division : Magnoliophyta.

Classe : Magnoliopsida.

Sous-classe : Asteridae.

Ordre : Solonales

Famille : Solanaceae

Genre : Solanum.

Nom : *Lycopersicon esculentum*. (**Toussaint et al., 2010**).



Figure 1 : Structure de fruit de la tomate.

1.4. Description botanique

La tomate est une plante herbacée annuelle, diploïde à $2n=24$ chromosomes, appartenant au groupe des légumes-fruits (**Baba Aissa, 1999**).

- **Le système racinaire:** forte racine pivotante qui pousse jusqu'à une profondeur de 50 cm ou plus. La racine principale produit une haute densité de racines latérales et adventices (**Shankara, 2005**).
- **La tige:** le port de croissance varie entre érigé et prostré. La tige pousse jusqu'à une longueur de 2 à 4 m, pleine, fortement poilue et glandulaire, se ramifie souvent pour donner un arbuste large et empli (**Shankara, 2005**).
- **Le feuillage:** feuilles disposées en spirale, 15 à 50 cm de long et 10 à 30 cm de large. Les folioles sont ovées à oblongues, couvertes de poils glandulaires. Les grandes folioles sont parfois bien à la base. L'inflorescence est une cyme formée de 6 à 12 fleurs. Le pétiole mesure entre 3 et 6 cm (**Shankara, 2005**).
- **Les fleurs:** Bisexuées, régulières entre 1.5 et 2 cm de diamètre. Le tube du calice est court et velu, les sépales sont persistants. En générale, il y a six pétales qui peuvent atteindre une longueur de 1 cm, jaunes et courbées lorsqu'elles sont mûres et six étamines et les anthères ont une couleur jaune vif entourant le style qui a une extrémité stérile allongée. L'ovaire est supère doté de deux à neuf carpelles. Souvent, la plante est autogame, mais la fécondation croisée peut avoir lieu où les abeilles et les bourdons sont les principaux pollinisateurs (**Shankara, 2005**).
- **Le fruit:** Baie charnue, de forme globulaire ou aplatie avec un diamètre de 2 à 15 cm. Lorsqu'il n'est pas encore mûr, le fruit est vert et poilu, en revanche, la couleur des fruits mûrs varie du jaune au rouge en passant par l'orange. Le fruit à maturité peut se présenter soit, rond et régulier ou côtelés (**Shankara, 2005**).
- **Les graines:** Nombreuses, en forme de rein ou de poire, poilues, beiges, de 3 à 5 mm de long et de 2 à 4 mm de large. L'embryon est enroulé dans l'albumen. Le poids de mille graines est en moyenne de 3 g (**Shankara, 2005**). Le cycle de la graine à la graine, est variable selon les variétés et les conditions de culture, il est en moyenne de 3.5 à 4 mois (7 à 8 semaines de la graine à la fleur et 7 à 9 semaines de la fleur au fruit) (**Gallais et Bannerot, 1992**).

1.5. Les variétés de tomate

Les tomates peuvent être classées d'après leurs caractères morphologiques et botaniques. Les variétés sont très nombreuses. A cet effet, ces dernières peuvent être classées selon leur croissance qui peut être du type indéterminé ou du type déterminé (**Polese, 2007**).

1.5.1. Les variétés à port indéterminé

Sont les plus nombreuses. Elles continuent de pousser et de produire des bouquets de fleurs tant que les conditions leur conviennent. Comme leur développement est exubérant, leur tige doit être attachée à un tuteur sous peine de s'affaisser au sol. Il est également nécessaire de les tailler et de les ébourgeonner régulièrement. Elles ont une production plus étalée et sont plus productives en général que les tomates à port déterminé. Parmi ce type de croissance, il existe:

- les variétés fixées: il existe plus de 500 variétés dont les caractéristiques génotypiques et phénotypiques se transmettent pour les générations descendantes. Elles sont sensibles aux maladies, mais donnent des fruits d'excellente qualité gustative (**Polese, 2007**). Les variétés les plus utilisées en Algérie sont la Marmande et la Saint Pierre (**Snoussi, 2010**).
- Les variétés hybrides: sont plus d'un millier. Elles sont relativement récentes puisqu'elles n'existent que depuis les années 1960, qui, du fait, de l'effet hétérosis, présentent la faculté de réunir plusieurs caractères d'intérêt (bonne précocité, bonne qualité de résistance aux maladies et aux attaques parasitaires et donc bon rendement). Ces hybrides ne peuvent être multipliés vu qu'ils perdent leurs caractéristiques dans les descendances (**Polese, 2007**). Les plus utilisés en Algérie sont ACTANA, AGORA, BOND, NEDJMA, TAFNA, TAVIRA, TOUFAN, TYERNO et ZAHRA (**Snoussi, 2010**).

1.5.2. Les variétés à port déterminé

Sont des variétés naines. Leur croissance s'arrête une fois la plante a produit un nombre déterminé de bouquets de fleurs (en générale trois ou quatre). C'est dans ce type de tomate que l'on trouve, le plus souvent, les variétés industrielles de conserverie, cultivées en plein champ. Pour ce type de croissance également, on retrouve des variétés fixées et des hybrides (**Polese, 2007**). Les hybrides suivants sont les plus utilisés en Algérie FAROUNA, JOKER, LUXOR, SUPER RED, TOMALAND, TOP 48, SUZANA, ZIGANA ZERALDA. Tandis que les variétés fixées : la variété AICHA (**Snoussi, 2010**).

1.6. La composition de la tomate

Les tomates peuvent avoir des compositions variables en fonction du cultivar, du lieu de culture, de la façon dont elles sont cultivées (techniques agricoles et facteurs environnementaux), ainsi que de la conservation post-récolte. Par exemple une intensité lumineuse plus importante permet d'obtenir une augmentation des teneurs en caroténoïdes et en vitamine C (**Génard et al., 2010**).

1.6.1. Eau

Le jus représente la majeure partie des constituants physiques de la tomate. La tomate est constituée de 94 à 96 % de jus. Dans le jus il contient 93.5% d'eau (**Cotte, 2000**).

1.6.2. Sucre

Les sucres contenus dans la tomate sont essentiellement des sucres réducteurs, le glucose représente 0,88-1,25%, et le fructose quant à lui représente 1,08-1,48% (**Moresial, 1982**).

1.6.3. Protéines

Les constituants protéiques sont présents en faible concentration dans La majorité des fruits et légumes. Ils sont toutefois d'une importance Capitale en tant qu'enzymes impliquées dans le métabolisme des fruits au cours de leur croissance. La tomate malgré sa faible teneur en protéines (1,1%) contient pratiquement tous les acides aminés (**Alhagadow, 2006**).

1.6.4. Lipides

La composition en lipides varie en fonction de la variété et du degré de maturité lors de la récolte ; il répertorie plus de 33 acides gras dans le péricarpe, la teneur en lipides est de 0,3g par 100g de poids frais (**Benard, 2009**).

1.6.5. Vitamines

Les vitamines sont des substances organiques sans valeur énergétique qui, une fois converties dans leur forme active, sont essentielles pour la croissance et le maintien de l'état de santé. Certaines vitamines ne sont pas synthétisées par le corps humaine d'une manière insuffisante, donc elles doivent être apportées par l'alimentation. Elles se divisent en deux groupes distinctifs, les hydrosolubles et liposolubles (**Haems, 2013**).

La tomate est considérée comme une bonne source en vitamine, qui joue un rôle bénéfique pour la santé. La tomate est reconnue pour sa richesse en vitamine C (vitamines

hydrosolubles), avec des teneurs variables selon les variétés et les conditions de culture; elles sont généralement comprises entre 7 et 30 mg/100g (de matière fraîche) mais peuvent atteindre 70 mg/100 g (**Chanforan, 2010**). L' α -tocophérol est la forme de vitamine E majoritairement retrouvée dans les tomates fraîches. Les autres formes du tocophérol (β -, γ - et δ -) sont également présentes mais dans des proportions plus faibles. Les teneurs en vitamine E varient beaucoup en fonction des variétés de tomate et des dates de récolte. Au sein du fruit, la vitamine E est répartie dans les différents tissus mais c'est dans les graines que les concentrations les plus importantes sont retrouvées. Or, elles ne sont pas digérées par l'organisme et la tomate contribue donc peu aux apports en vitamine E (**Marsic *et al.*, 2010**). Par ailleurs, ce fruit contient aussi des vitamines B1, B2, B3 et B5 (thiamine, riboflavine, niacine et acide pantothénique) pour les liposolubles elle contient essentiellement de la provitamine A (bêta carotène) avec une teneur de 346 μ g/100 g (**Outis et Yahiya, 2016**).

1.6.6. Fibres

Les fibres alimentaires sont des éléments qui font partie des parois des cellules, ou encore des substances complémentaires, qui ne sont pas détruites par les sécrétions gastro-intestinales du système digestif et de ce fait traversent l'intestin grêle sans être digérées (**Henauer *et al.*, 2008**).

1.6.7. Minéraux

Les minéraux sont des substances que le corps ne peut pas synthétiser, elles sont notamment nécessaires pour la régulation des enzymes et des hormones (**Haems, 2013**).

Les principaux minéraux qui entrent dans la constitution de la tomate sont : le Calcium (9.7 à 15 mg/100g), le Magnésium (3 à 11 mg/100g), le Fer (0.2 à 0.6 mg/100g), le Phosphore (20 à 27 mg/100g), le Potassium (202 à 300 mg/100g) et le Sodium (3 à 11 mg/100g) (**Grasselly *et al.*, 2000**).

1.6.8. Composition en antioxydants de la tomate

Un antioxydant est une molécule qui diminue ou empêche l'oxydation d'autres substances chimiques.

L'effet des antioxydants provient de deux mécanismes, ils neutralisent les radicaux libres et empêchent les réactions en chaîne initialisées par ces derniers, détruisent les hydro

peroxydes (composés intermédiaires formant des radicaux libres en interrompant la liaison O-O), diminuant ainsi la vitesse de formation de radicaux libres (Penchev, 2010).

1.6.8.1. Caroténoïdes

Le caroténoïde retrouvé majoritairement chez les tomates rouges est le (*E*)-lycopène qui constitue leur principal pigment avec une teneur de 0,11 à 17,5 mg/100g et le β -Carotène avec 0,08 à 1,06 mg/100g (Chanforan, 2010).

1.6.8.2. Composés phénoliques

Une grande diversité de composés phénoliques a été identifiée dans la tomate et parmi ces composés on trouve l'acide chlorogénique avec une teneur de 3,67 à 21,0 mg/100g, la rutine avec 19,8 à 31,23 mg/100g et Naringénine avec une teneur de 0 à 22,48 mg/100g (Chanforan, 2010).

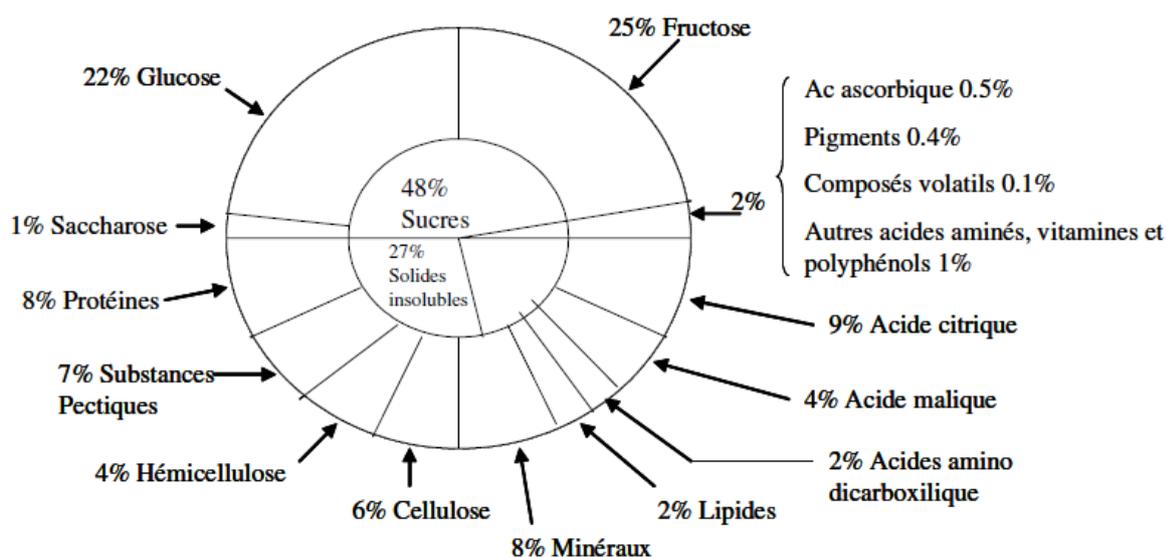


Figure 2 : Composition moyenne de la matière sèche du fruit de tomate (adaptée de Davies et Hobson 1981).

1.7. Écophysiologie et facteurs de l'environnement

1.7.1. Température

La température est un des facteurs essentiels qui intervient dans la physiologie de la tomate. En climat froid, les tomates sont cultivées comme plante annuelle. La tomate ne tolère pas le gel. La température optimale du substrat pour la germination se trouve entre 20 et 25

°C. La germination est quasiment impossible sous 10 °C et au-dessus de 35 °C. Des optimums de température du substrat existent aussi pour la croissance des systèmes aérien et racinaire, mais ils sont variables selon la variété. La température du substrat a aussi une influence sur les fleurs ainsi que sur les fruits. Pour ce qui est de la température de l'air, les effets des différents niveaux de températures diffèrent selon la phase diurne ou nocturne. On peut signaler que les températures nocturnes élevées limitent la croissance racinaire. De plus, la température nocturne a une grande influence sur l'élongation de la tige. Des températures nocturnes dépassant les 17 °C. C'est au cours de la phase nocturne que les produits de la photosynthèse migrent depuis les feuilles assimilatrices jusqu'aux autres parties de la plante. La température nocturne a aussi son rôle à jouer dans le nombre et la taille des fleurs, la quantité et la qualité du pollen ainsi que pour l'absorption du calcium. Il faut souligner que le niveau optimal nocturne est aussi fonction des températures diurnes. Les températures diurnes ont moins d'effet sur la croissance végétative. Cependant, il faut savoir qu'une amplitude jour-nuit de 6 °C semble favorable à la croissance végétative ainsi qu'à la formation et au développement des inflorescences. Un autre fait important est que les températures optimales varient avec l'intensité lumineuse. Ainsi, elles tournent autour de 18 °C par temps couvert et sont plutôt de 21-22 °C lorsque le temps est ensoleillé (**Chaux, 1994 et Stickland, 1998**).

1.7.2. Lumière

La tomate aime les situations bien ensoleillées mais elle ne présente pas d'exigence photopériodique très marquée. Pendant les quatre à six semaines qui suivent le semis, les fortes intensités lumineuses encouragent le raccourcissement de l'axe et l'induction du premier bouquet, surtout à température basse. Pendant la floraison, une forte intensité lumineuse favorise la pollinisation et régularise la croissance du style, surtout lorsque la température du substrat est élevée. Par contre, l'insolation directe des fruits et l'élévation de température que cela entraîne est nocif quant à leur qualité (**Chaux, 1994**).

1.7.3. Hygrométrie

L'hygrométrie doit être maintenue à 70-80% pendant la phase végétative. Au-delà, les risques de maladies fongiques augmentent. Durant la floraison, il est préférable de descendre à 60-70 %, pour faciliter la dispersion du pollen.

Lors du grossissement et du début de maturation des fruits, une hygrométrie élevée pendant la nuit accroît l'absorption du calcium et réduit la fréquence de nécrose apicale.

Pendant la journée, elle limite les craquelures et amoindrit les défauts de coloration (**Chaux, 1994**).

1.7.4. Alimentation en eau

L'alimentation hydrique est un facteur important du rendement et de la qualité, entre autres du calibre. La tomate est gourmande en eau. Une alimentation en eau irrégulière entraîne une irrégularité du point de vue de l'alimentation en calcium et entraîne donc la nécrose apicale. Les besoins hydriques sont surtout importants à partir de la floraison du deuxième bouquet.

La tomate est très sensible à l'asphyxie racinaire. Par conséquent, il faut éviter les excès d'eau. En effet, un excès d'eau chronique mais discret peut entraîner des carences (d'abord en magnésium puis en phosphore et en azote), d'où une récolte réduite. Si l'asphyxie racinaire est chronique, cela compromet la croissance et peut aller jusqu'à entraîner la mort de la plante (**Chaux, 1994**).

1.7.5. Sol

La tomate privilégie une terre meuble et fraîche mais elle n'est pas exigeante concernant la nature du sol. Néanmoins, il faut à tout prix que celui-ci ne soit pas asphyxiant. La profondeur peut être un facteur limitant, surtout lorsque le climat est chaud, même en présence d'irrigation.

La tomate privilégie une terre meuble et fraîche mais elle n'est pas exigeante concernant la nature du sol. Néanmoins, il faut à tout prix que celui-ci ne soit pas asphyxiant. La profondeur peut être un facteur limitant, surtout lorsque le climat est chaud, même en présence d'irrigation.

La texture est rarement un obstacle vu que la teneur en argile peut varier de 10 à 40%. Il faut éviter les sols trop battants et mal structurés en profondeur. En effet, dans ce cas, il y a un risque d'asphyxie racinaire pouvant entraîner une nécrose apicale du fruit.

L'espèce est très tolérante en ce qui concerne le pH, l'idéal se situant entre 6 et 7 pour une question d'équilibre nutritionnel. Elle est aussi moyennement sensible à la salinité (**Chaux, 1994**).

1.7.6. Nutrition minérale

Les exportations pour l'ensemble de la culture varient fortement selon les rendements, la durée du cycle, le type de culture et les techniques qui s'y rapportent, notamment la taille et l'irrigation. D'une façon générale, les besoins sont très élevés en potasse et en azote.

Il faut souligner comme accident nutritionnel la nécrose apicale ou « cul brun ». Elle résulte d'une carence localisée (près de l'attache pistillaire) et momentanée en calcium. Elle est liée à une concurrence entre les organes transpirants et les fruits. Les conditions qui défavorisent l'absorption de calcium et augmentent la transpiration accentuent les risques de compétition et donc de nécrose apicale. Cette nécrose physiologique est courante et grave car elle se manifeste par de larges taches déprimées, blanchâtres puis brunes, situées au sommet du fruit (Chaux, 1994).

1.8. La production de tomate fraîche

1.8.1. Principaux pays producteurs de la tomate dans le monde

Les Principaux pays producteurs de la tomate fraîche qui ont été remarqué en 2018 présentés dans le Tableau 1.

Tableau 1: les Principaux pays producteurs de la tomate fraîche en 2018.

Position	Région	Production (Tonnes)	Position	Région	Production (Tonnes)
1	Chine	61 523 462	11	Nigéria	3 913 993
2	Inde	19 377 000	12	Fédération de Russie	2 899 664
3	États-Unis	12 612 139	13	Ukraine	2 324 070
4	Turquie	12 150 000	14	Ouzbékistan	2 284 217
5	Egypte	6 624 733	15	Maroc	1 409 437
6	Iran	6 577 109	16	Tunisie	1 357 621
7	Italie	5 798 103	17	Portugal	1 330 482
8	Espagne	4 768 595	18	Algérie	1 309 745
9	Mexique	4 559 375	19	Cameroun	1 068 495
10	Brésil	4 110 242	20	Indonésie	976 790

Source: FAOSTAT (avr. 09, 2020)

Les plus grands producteurs de la tomate au monde sont la Chine en premier lieu avec plus de 61 millions de tonnes, ensuite vient l'Inde avec 19 Millions de tonnes, ensuite l'USA avec 12 millions de tonnes.

En Chine, La Chine est de loin le premier producteur mondial, production destinée essentiellement (environ 85 %) au marché intérieur pour la consommation, la production est passée de 25.6 millions de tonnes en 1994 à 46.7 millions en 2010 à 61.5 millions de tonnes en 2018.

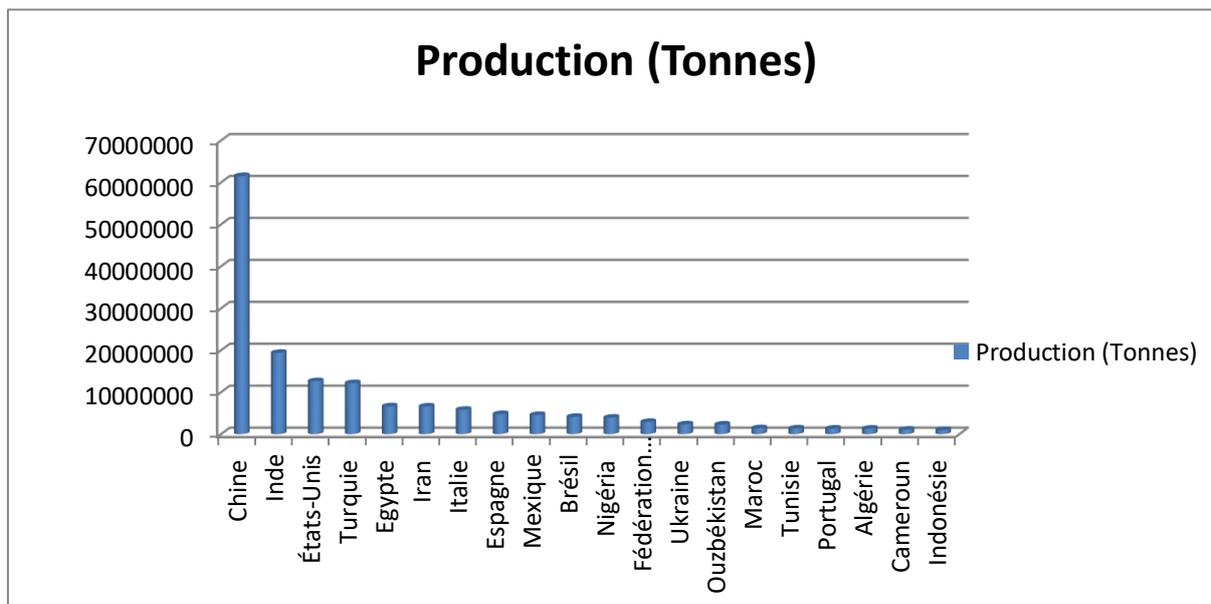


Figure 3 : Principaux pays producteurs de la tomate 2018.

1.8.2. Production de la tomate en Algérie

La culture de la tomate en Algérie se place en seconde position après la pomme de terre. En effet les conditions climatiques des régions productrices de tomate sont très favorables pour l'obtention de bons rendements (Zidani, 2007). Le tableau suivant montre la variation de la production, le rendement et la superficie récolté Algérienne de la tomate :

Tableau 2: Production, rendement et superficie des tomates fraîches récoltées en Algérie entre 2010 et 2018.

Année	Superficie récoltée ha	Rendement hg/ha	Production tonnes
2010	21 358	336 284	718 235
2011	20 575	375 021	771 606
2012	21 542	369 958	796 963
2013	22 497	433 424	975 075
2014	22 646	470 551	1 065 609
2015	24 065	483 593	1 163 766
2016	22 556	567 729	1 280 570
2017	23 977	536 467	1 286 286
2018	22 323	586 729	1 309 745

Source: FAOSTAT (avr. 09, 2020).

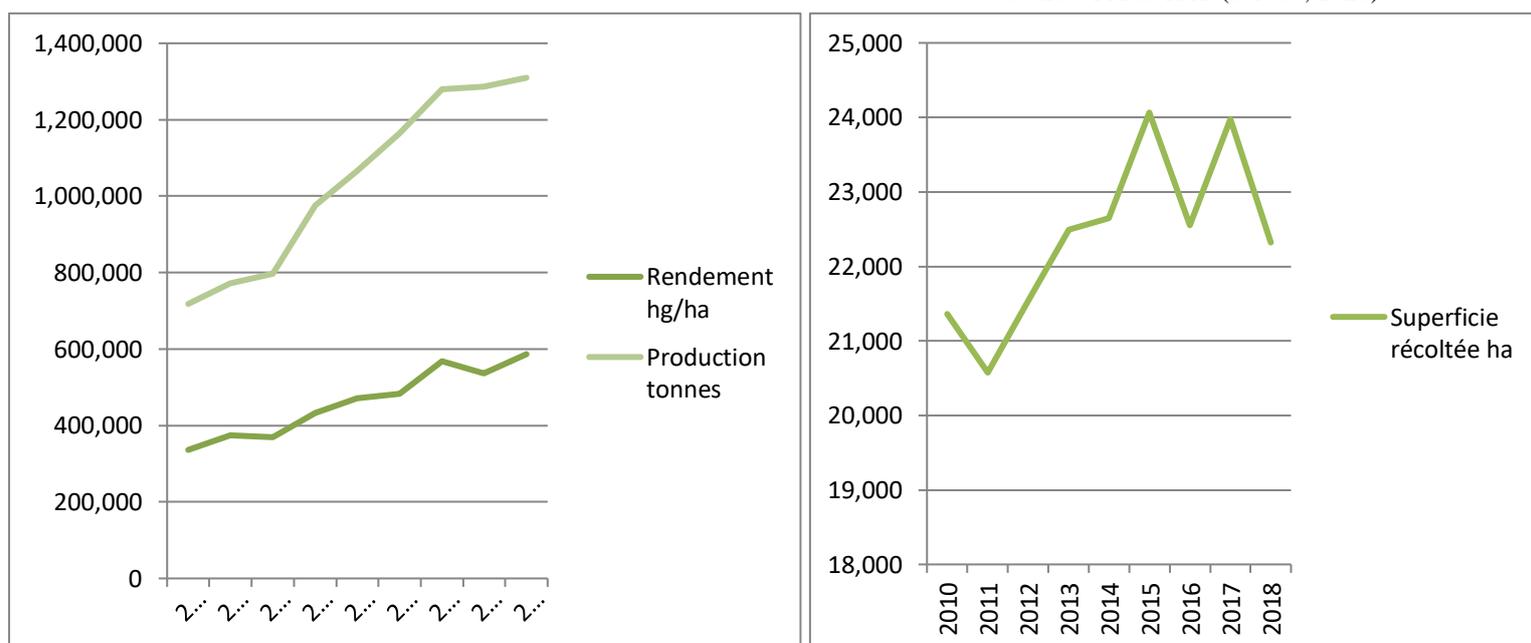


Figure 4: Production, rendement et superficie des tomates fraîches récoltées en Algérie entre 2010 et 2018.

1.9. Importance de la tomate

1.9.1. Importance économique et production actuelle

La tomate est la troisième espèce cultivée au monde, après la pomme de terre et la patate douce, et le deuxième légume le plus consommé (**De Broglie et Guérout, 2005**). Ce légume représente donc un enjeu économique, et est soumis à une concurrence importante. Cent cinquante millions de tonnes de tomates sont produites annuellement dans le monde (**FAO 2005 et Péron, 2006**). Cette production se répartit sur tous les continents : 44% en Asie, 22,5% en Amérique, 21,5% en Europe, 12% en Afrique (**Grasselly et al. ,2000**). La France est le sixième producteur européen, derrière la Turquie, l'Italie, l'Espagne, la Grèce et le Portugal (**Interfel, 2008**).

1.9.2. Importance médicinale

Le rôle médicinale de la tomate est connu depuis bien longtemps chez les Incas en Amérique de sud, où ils utilisent la feuille fraîche du plant de tomate comme antibiotique (**Philouze etHedde, 1995**). Plusieurs études prospectives et épidémiologiques ont démontré qu'une consommation élevée de fruits et de légumes diminuait le risque de maladies cardiovasculaires, de certains cancers et d'autres maladies chroniques (**Bazzano et Serdula, 2003**).

Quelques mécanismes d'action ont été proposés pour expliquer cet effet protecteur, la présence d'antioxydants dans les fruits et les légumes pourraient jouer un rôle.

Aussi la consommation de tomate joue plusieurs rôles :

- Excellent pour la santé du foie, car contient des traces d'éléments antitoxiques appelées chlorite et sulfure.
- Diminue l'hypertension grâce à son haut taux en potassium.
- Stimule les sécrétions digestives, grâce à sa saveur acidulée.
- Contribue à la prévention des maladies cardiovasculaires, l'artériosclérose et la cécité.
- La prévention du cancer grâce à son teneur en pigments caroténoïdes antioxydants notamment sa forte concentration en lycopène (3.5mg/125g de tomate) (**Basu et Imrhan, 2006**).

Chapitre 2

DESHYDRATATION

OSMOTIQUE

PARTIELLE

Chapitre 2: DESHYDRATATION OSMOTIQUE

PARTIELLE

2.1. Définitions

La déshydratation osmotique (DO) est une opération simple utilisée dans de nombreuses méthodes de conservation d'aliments (salage de viande et poisson, fruits confits). Le processus de déshydratation osmotique consiste à faire immerger des produits végétaux ou animaux, parés ou découpés, dans des solutions concentrées contenant un ou plusieurs solutés (sel, sucre) dans des conditions de température douces pendant un temps suffisant pour obtenir un transfert de matière optimum (**Krokida et al., 2000**). Elle est attribuée au phénomène d'osmose qui se manifeste à travers les membranes cellulaires «semi-perméables» (perméables à l'eau, mais moins aux solutés) des tissus (**Raoult-Wack, 1994**). En effet, ceci conduit à une déshydratation du produit, ainsi qu'à son imprégnation par les substances contenues dans la solution. C'est une opération qui permet de réduire la teneur en eau du produit avec une amélioration de sa qualité (**Nsonzi et Ramaswamy, 1998**).

La déshydratation osmotique présente un certain nombre d'atouts par rapport aux techniques traditionnelles de séchage. En particulier, l'aliment est traité à plus basse température (entre 5 et 85 °C) et à l'abri de l'oxygène (puisqu'il est immergé), ce qui est particulièrement favorable pour les produits sensibles aux réactions de dégradation oxydative et thermique (**Lerica et al., 1985 ; Garcia-Segovia et al., 2010**). De plus, la DO permet de réduire la charge microbienne et ainsi de prolonger la période de conservation des produits (**Castello et al., 2009**).

Raoult-Wack, (1994) a montré que le moteur de ce transfert est une différence de concentration entre la solution et le matériau à traiter. Il se traduit par deux écoulements simultanés à contre-courant : une diffusion de l'eau des cellules du produit (la solution la moins concentrée) vers la solution hypertonique où l'aliment est plongé (déshydratation) et une entrée de soluté de la solution vers l'aliment (imprégnation). L'aliment peut ainsi perdre jusqu'à 50 % de la teneur initiale en eau en moins de trois heures (**Lerica et al, 1985**). La sortie d'eau s'accompagne généralement d'une perte de solutés propres au produit alimentaire. Ce transfert, quantitativement négligeable par rapport aux deux premiers, soulève

des critiques quant à son impact sur les qualités organoleptiques et nutritionnelles du produit transformé (Albagnac *et al.*, 2002).

Afin d'améliorer l'efficacité du processus de déshydratation osmotique, divers traitements peuvent être appliqués pour faciliter la diffusion de l'eau : ultrasons, irradiation, champ électrique pulsé, etc. Pour une conservation de très longue durée, le produit obtenu après déshydratation osmotique peut encore subir un traitement complémentaire, tel qu'un séchage à l'air (Garcia-Segovia *et al.*, 2010).

2.2. Principe

Ce qu'on appelle déshydratation osmotique dans le domaine de la transformation des fruits, est un procédé de réduction de la teneur en eau obtenue par immersion des fruits, entiers ou en morceaux, dans une solution hypertonique de sucres divers. En principe, l'osmose décrit les mouvements de l'eau et des solutés qui se produisent quand deux solutions sont séparées par une membrane semi-perméable, en raison de la pression osmotique relative de chaque composé (Maltiniet *al.*, 2003). Dans ces conditions, une fraction des matières sèches du fruit (acides organiques et sels minéraux en particulier) se déplace vers la solution concentrée (figure 5).

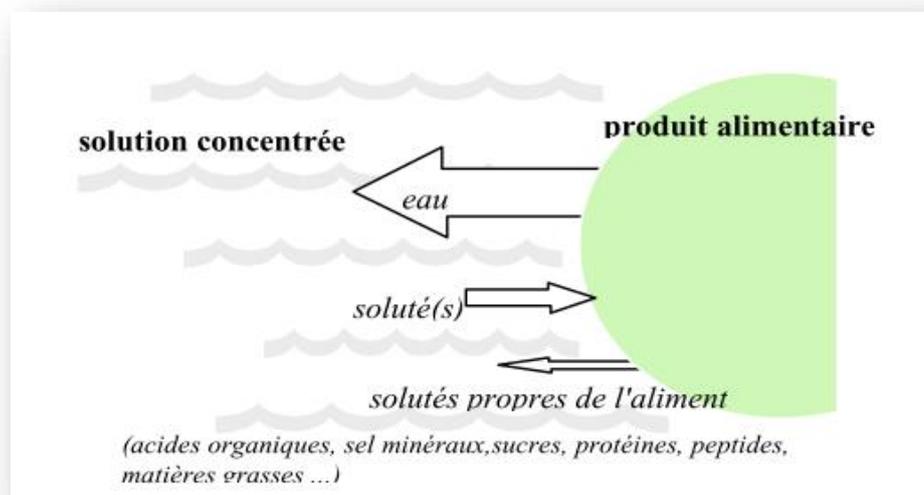


Figure 5 : Transferts de matière entre la solution et le produit alimentaire (Raoult-Wack, 1994).

2.3. Cinétique de la déshydratation osmotique

Les cinétiques de transfert de matière dans les produits végétaux peuvent se décomposer en deux phases : une première phase, responsable de l'essentiel des transferts d'eau et de soluté,

suivie d'une seconde phase, pendant laquelle la perte en eau ralentit fortement tandis que les débits d'entrée en solutés continuent d'augmenter régulièrement (**Kowalska et al., 2008**). Il semble probable que les membranes cellulaires soient victimes d'une perte de leur caractère semi-perméable, permettant progressivement aux solutés de pénétrer dans la cellule (**Raoult-Wack, 1994**). La durée de la première phase est très variable suivant le produit traité, d'une demi-heure à deux heures dans les conditions les plus courantes (morceaux de petites tailles, de l'ordre du cm³). Ces transferts se déroulent à travers les parois et membranes cellulaires du produit. A l'intérieur de ces derniers, les espaces intercellulaires servent de lieux d'accumulation ou de passage pour les substances échangées (**Raoult-Wack, 1994 ; Lenart, 1996 ; Kowalska et al., 2008**).

– **L'approche classique** qui se base sur la détermination de deux paramètres. En effet, des travaux antérieurs ont prouvé que deux paramètres peuvent quantitativement représenter le processus osmotique. 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 (**Krokida et al., 2000 ; Riva et al., 2005 ; Garcia-Segovia et al., 2010**).

– **L'approche fine** qui se base sur l'étude des paramètres déterminés à partir de la calorimétrie différentielle à balayage et la RMN.

L'évolution de la perte en eau et du gain en solide au cours de la déshydratation osmotique est déterminée par le modèle mathématique d'AZUARA (**Torrengiani, 1993**). Les équations utilisées pour le calcul des pourcentages de la perte en eau (PE) et en poids (PP) et du gain en substances solides solubles (GS) au cours du transfert de masse à contre-courant sont les suivantes:

$$PE = \frac{S_1 * t * PE_e}{1 + S_1 * t} \quad \text{Hawkes et al., (1978).}$$

$$GS = \frac{S_2 * t * GS_e}{1 + S_2 * t} \quad \text{Raoult-Wack, (1994).}$$

Ou : PE : quantité d'eau éliminée du produit au temps t (g/100g). GS : quantité des substances solides solubles transférée au produit au temps t (g/100g). PE_e : quantité des substances solides solubles transférée au produit à l'équilibre, GS_e : pourcentage du gain en solide à l'équilibre, t : temps en sec, S₁ : constante liée à la perte en eau, S₂ : constante liée au

gain en solide. La perte en poids (PP) durant la déshydratation osmotique est calculée par la différence entre la perte en eau (PE) et le gain en soluté (GS) :

$$PP = PE - GS \text{ Ferradji, (2015).}$$

2.4. Principaux facteurs influençant la cinétique de la déshydratation osmotique

Les transferts d'eau et de solutés dépendent à la fois des propriétés intrinsèques des tissus traité et des conditions opératoires de traitement : température, concentration et composition de la solution, temps et mode mise en contact du produit et de la solution osmotique, la taille et la forme des particules et le ratio solide-liquide.

2.4.1. Propriétés des tissus biologiques

La grande variabilité observée dans le comportement des végétaux au cours d'une DO est généralement attribuée aux différentes propriétés tissulaires. Ces dernières sont : la compacité des tissus (**Giangiaco** *et al.*, 1987), l'importance relative des espaces intra et extra cellulaires (**Hawkes et Fink**, 1987 ; **Dalla Rosa et al.**, 1982 ; **Lozano et al.**, 1983), la présence de gaz occlus (**Lozano et al.**, 1983), la porosité (**Lazarides et al.**, 1997) et la teneur initiale en matière insoluble (**Lenart et Flink**, 1984a). En outre, l'état et l'évolution physiologique des tissus affectent les transports d'eau et de solutés. De nombreux résultats ont été obtenus sur des tissus parenchymateux (**Bolin et al.**, 1983 ; **Marcotte et le Maguer**, 1991). Les changements de porosité produits par le traitement osmotique, favorisent l'action des forces d'entraînement « gradients de pression » (**Barat et al.**, 1998). La porosité du produit alimentaire affecte notamment sa texture (**Andrés et al.**, 2004 ; **Nieto et al.**, 2004).

Le traitement osmotique peut provoquer la mort de certaines cellules (superficielles qui sont en contact direct avec la solution osmotique), tandis que les autres restent pratiquement inchangées (**Rastogi et al.**, 2002).

2.4.2. 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 (**Wack Raoult**, 1994). En effet, toute augmentation de la concentration en sucre se traduit principalement par une augmentation des vitesses de transfert d'eau, les transferts de soluté n'étant que peu affectés (**Vial et al.**, 1990).

2.4.3. Température de la solution osmotique

Une augmentation de la température a comme conséquence une augmentation du gradient de pression osmotique entraînant par la suite un grand transfert de masse.

Entre 20 et 40°C (**Lerici et al., 1977**) la semi-perméabilité des membranes cellulaires de différents végétaux est à peine affectée et ne permet pas de lixiviation du contenu cellulaire. L'extraction de l'eau est alors possible seulement par des processus osmotiques. Une température supérieure à 50°C (**Ponting et al., 1966**) entraîne une perte irréversible de la sélectivité des membranes cellulaires, d'où une modification de la structure et de la texture des matériaux et aussi le développement de certaines réactions enzymatiques.

D'autre part une température faible entraîne une augmentation de la viscosité de la solution osmotique diminuant l'efficacité d'agitation et ralentissant le transfert de masse externe (**Lenart et Flink, 1984**).

2.4.4. Durée de 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 ; Marchal et al., 2005**) 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. Ce phénomène déjà mentionné est attribué à la mort des cellules qui accompagne l'augmentation de la concentration en sucre dans le tissu (**Mavroudis et al., 2004**). Ceci conduit à la perte de fonctionnalité de la membrane cellulaire et peut affecter la qualité du produit. **Lenart (1996)** a montré que la durée de déshydratation de morceaux de pomme ne doit pas dépasser une durée de 15 min à une température comprise entre 70 et 90°C.

Tableau 3: Les conditions optimales de la déshydrations osmotique des fruits et des légumes.

Fruit et Légume	Concentration en soluté saccharose	Température (c°)	Temps (min)	Rapport (produit/solution)	Référence
Pois Patate	60° Brix	60	120	1 :8	Abud-archila., 2008
Ananas	62° Brix	30	360	1 :6	Singh et al., 2008
Oranges	65° Brix	50	240	1 :5	Khatir., 2013
Frais	50° Brix	50	120	1 :4	Ferradji et al., 2016
Carottes	50° Brix	55	60	1 :4	Ferradji et al., 2017
Grenade	50° Brix	40	420	1 :4	Khoualdia et al., 2020

2.5. Applications de la déshydratation osmotique

2.5.1. Prétraitement thermique

Plusieurs méthodes de prétraitements telles que le blanchiment (par immersion ou par chauffage thermique) et la congélation sont capables de modifier les propriétés structurales des produits végétaux.

2.5.1.1. Le blanchiment

Est un traitement thermique, réalisé par immersion du produit dans un bain d'eau chaude, par passage dans une atmosphère de vapeur ou par chauffage ohmique. Sa durée est de quelques minutes, dans une gamme de 85°C à 100°C. Il permet de détruire les enzymes susceptibles d'altérer les légumes ou les fruits avant leur traitement ultérieur (dans notre cas c'est la déshydratation). Ce procédé prévient ainsi un certain nombre d'altérations organoleptiques, telles que des modifications de saveurs et de couleurs (dégradation de la chlorophylle, brunissement des pommes, etc.). Il limite également certaines pertes nutritionnelles comme la destruction des vitamines, et permet l'élimination de l'air et des gaz occlus dans les tissus végétaux facilitant la réhydratation (**Dermesonlouglou et al., 2008**).

Vis-à-vis de la DO, le blanchiment facilite le transfert des matières dissoutes, comme il l'a été rapporté pour les tranches de pomme et de tomate précédemment blanchies à la vapeur (**Dermesonlouoglou et al., 2008 ; Kowalska et al., 2008**).

2.5.1.2. Congélation

L'eau est le principal composant de la majorité des aliments congelés du commerce. Une part notable de cette eau est liée à divers degrés: dans des complexes colloïdaux macromoléculaires, dans des structures gélifiées ou fibreuses à l'intérieur des cellules, et dans les hydrates. Lors de la congélation, la nucléation de la glace et la croissance des cristaux apportent de nombreuses modifications au produit (**Talens et al., 2003**). Les composantes cellulaires solubles peuvent atteindre la saturation et précipiter, détruisant ainsi la turgescence des tissus; des modifications de pH peuvent affecter les complexes colloïdaux ; des changements très marqués de pression osmotique peuvent rompre les membranes semi-perméables, ce qui facilite le transfert de masse au cours de la déshydratation osmotique (**Floury et al., 2008 ; Kowalska et al., 2008 ; Dermesonlouoglou et al., 2008**). La vitesse de congélation et la température finale de conservation sont des points critiques pour le maintien des propriétés sensorielles, fonctionnelles ou biologiques après la congélation. Une congélation très lente peut conduire à un exsudat excessif à la décongélation, alors qu'une congélation très rapide permet de préserver la texture de certains produits (**Talens et al., 2003**).

2.5.2. Stabilisation des produits déshydratés osmotiquement par des traitements physiques

Les produits issus du procédé de déshydratation osmotique sont classés parmi les produits à humidité intermédiaire (PAI), à taux d'humidité élevé (**Garcia-Martinez et al., 2002**). Aussi le produit n'est pas encore microbiologiquement stabilisé, et l'activité de l'eau peut y être élevée. Plusieurs traitements ont été proposés pour parfaire le processus: séchage, congélation, pasteurisation, friture etc. Les plus communs sont le séchage par air (**Ade-Omowaye et al., 2003**) et la congélation (**Agnelli et al., 2005**).

2.5.2.1. Séchage

Le séchage provoque un abaissement de l'activité d'eau du produit, c'est-à-dire que l'eau reste peu disponible pour les micro-organismes et pour les réactions chimiques. On considère

généralement qu'un produit est stable lorsque son activité de l'eau est inférieure ou égale à 0,65 (**Thebud et Santarius, 1982**).

L'utilisation du séchage dans les industries agroalimentaires a de multiples objectifs : accroître la durée de conservation des produits, stabiliser les produits agricoles (maïs, luzerne, riz, lait, ...) pour amortir le caractère saisonnier de certaines activités, et transformer les produits par des réactions biochimiques ou biologiques (produits de salaison, touraillage de malt, etc.). Cependant, cette technique est coûteuse en énergie: le séchage des produits végétaux nécessite environ 5000 kJ/kg d'eau évaporée (**Mujumdar, 2006**).

La combinaison de la déshydratation osmotique avec le séchage permet d'améliorer la qualité des produits (**Fernandes et al., 2006**) et de réduire le coût énergétique global de l'élimination de l'eau. En effet, la pré-déshydratation diminue le temps de séchage et le besoin énergétique du séchage complémentaire (**Fernandes et al., 2006**). En effet, la DO n'exige qu'entre 100 et 2400 kJ/kg d'eau enlevée, selon les applications (**Mujumdar, 2006**). Après une période de mise en régime, la cinétique de séchage par l'air est caractérisée par une période à vitesse constante, correspondant à l'évaporation de l'eau de surface qui est constamment renouvelée par transport interne et qui se traduit par une variation linéaire de la teneur en eau en fonction du temps. Cette première période est suivie d'une ou plusieurs étapes à vitesses décroissantes, où les forces capillaires n'acheminent plus suffisamment d'eau en surface pour compenser l'évaporation (**Ade-Omowaye et al., 2003**). Pour les produits alimentaires et biologiques, le séchage est limité par la résistance des parois cellulaires, par la migration des solutés qui obstruent les pores et par le croûtage de la surface (**Wang et Sastry, 2000; Ade-Omowaye et al., 2003**).

2.5.2.2. Congélation

La congélation des aliments est un excellent moyen de maintenir pendant longtemps, presque inchangées, leurs valeurs nutritionnelles. Cette préservation de la qualité s'explique tant par l'abaissement de la température qui ralentit les réactions biochimiques et inhibe les activités microbiennes que par la réduction de l'activité de l'eau du substrat (**Floury et al., 2008**).

La possibilité de prétraiter les produits par une déshydratation partielle (voire par imprégnation) avant congélation semble prometteuse (**Talens et al., 2003 ; Wu et al., 2009**). Cette technique, dite de déshydro-congélation, permet la réduction de la quantité d'eau dans le

produit afin de diminuer la quantité de cristaux formés, le temps de congélation et de décongélation. Il en résulte une meilleure conservation des propriétés du fruit. La déshydratation osmotique constitue de ce point de vue un prétraitement efficace (**Talens et al., 2003 ; Dermesonlouoglou et al., 2008**).

Au point de vue énergétique, on notera que, sans déshydratation préalable, la congélation des fruits nécessite entre 250 et 340 kJ/kg d'eau congelée, et entre 150 et 320 kJ/kg d'eau congelée pour les légumes (**Mujumdar, 2006**).

2.6. Valorisation des fruits conservés en solution sucrées

Les fruits ont été depuis longtemps conservés par le sucre. La fabrication de produits déshydratés osmotiquement remonte à la haute antiquité. Aujourd'hui, la conservation des fruits par les sucres est devenue une industrie à part entière, et est appliqué à une vaste gamme de produits, comme les fruits confits (**Espiard, 2002**), les compotes et purées (**Espiard, 2002**), la confiture (**Espiard, 2002 ; Albagnac et al., 2002**), les marmelades et pâtes de fruits (**Espiard, 2002 ; Albagnac et al., 2002**). On trouve sur le marché un nombre de produits apparentés ayant tous subis des transformations visant non seulement à obtenir des fruits stables à température ambiante (grâce à une réduction de leur activité d'eau), mais a aussi leur conférer une texture et une saveur spécifique (**Albagnac et al., 2002**).

2.7. Qualité des produits déshydratés et séchés

La qualité des produits déshydratés et séchés restent discutable selon les méthodes utilisées. Les conditions de préservation par séchage (solaire particulièrement) de par leur conduite archaïque influencent négativement la qualité organoleptiques, nutritionnelles et sensorielles des aliments (**Albitar, 2010**). Lors de la déshydratation ou du séchage, la couleur du produit change. Ces changements sont la conséquence d'activités enzymatique et non enzymatique. Le brunissement non enzymatique (réaction de Maillard) désigne un ensemble de réactions très complexes aboutissant à la formation de pigments bruns ou noirs, accompagnés de modifications favorables (fabrication de caramel...), mais aussi défavorables et indésirables (**Birlouez-Aragon, 2008**). La couleur, tout comme la teneur en vitamines, est particulièrement détériorée durant un séchage solaire prolongé qui est aussi à l'origine d'une pollution microbienne des fruits due à la poussière et aux insectes (**Bourgeois et al., 1996**). Une fois séché, le fruit perd entre 80 à 90 % d'eau. La déshydratation permet une augmentation de la concentration en éléments nutritifs et en sucre du fruit. Il est alors 5 à 6

fois plus calorique qu'à l'état naturel. Les glucides (sucre) des fruits séchés représentent en fait 70 % de l'apport énergétique de l'aliment, contre 10 % pour les fruits frais (Creff, 2004). Les minéraux et certaines vitamines se retrouvent aussi en forte proportion dans ces aliments. Les fruits séchés sont une très bonne source de fer, de potassium et de fibres alimentaires. La teneur en vitamine A des abricots et pêches séchés est très élevée. Tandis que les vitamines sensibles à l'eau, la chaleur et la lumière, comme la vitamine B et C, sont pratiquement absentes de ces fruits, car elles sont détruites lors du procédé de déshydratation (Jouve, 1996). D'une manière générale, pour avoir une bonne qualité du produit, les paramètres physico-chimiques et gustatifs sont à respecter à toutes les étapes des procédés. Mais un séchage prolongé ou mal conduit détériore irrémédiablement les propriétés des fruits et légumes (Noutet *al.*, 2003). Les améliorations à apporter aux techniques de séchage et de déshydratation consistent depuis quelques décennies en la maîtrise de la cinétique des phénomènes mis en œuvre afin de paramétrer les niveaux de déshydratation et d'imprégnation souhaités (Raoult-Wack, 1994).

2.8. Importance du couplage déshydratation osmotique-séchage

Les produits résultant de la DO ne sont pas suffisamment stables. Par conséquent. Ce processus est souvent suivi d'un traitement complémentaire comme le séchage thermique. En effet, dans le pays en développement, le séchage est le mode de conservation le plus utilisé pour les denrées alimentaires (N'goran *et al.*, 2012). Beaucoup de travaux entrepris sur les divers fruits ont montré que la combinaison du séchage et de la DO augmente la durée de conservation des fruits et améliore leur qualité (Jiokap, 2002; Ndjouenkeu *et al.*, 2003; Fernandes *et al.*, 2006). En effet, (Beedie *et al.*, 1995) ont indiqué que l'amélioration de la consommation énergétique de 1 % pourrait se traduire par plus que 10 % d'augmentation dans les bénéfices. En réduisant la teneur en eau des produits alimentaires avant de procéder au séchage, la durée peut être significativement réduite. Ainsi, la déshydratation-imprégnation par immersion (DII) comme prétraitement précédant le séchage permet de minimiser la consommation d'énergie utilisée pour le chauffage du produit alimentaire et l'évaporation de l'eau du produit. (Kudra *et al.*, 2009) ont montré que la DO des pommes permet de réduire la consommation de l'énergie totale de 24 à 75 %.

2.9. Exemples sur la déshydratation osmotique partielle de la tomate

De nombreux auteurs se sont intéressés à l'étude de l'influence des conditions opératoires du procédé de la déshydratation osmotique partielle sur la perte en eau, la perte en poids et le gain en solide de la tomate. La qualité nutritionnelle et sensorielle du produit final dépend également de l'influence de ces facteurs. Le consommateur étant devenu très exigeant sur la qualité des tomates déshydratées, plusieurs études récentes sont menées afin d'améliorer les caractéristiques du produit fini (sensorielle, fonctionnelle et nutritionnelle).

Deux séries d'expériences de DO de tomate ont été réalisées par **HUU, (2009)**. Dans un premier temps, la DO des tranches de tomate de 8mm a été réalisée dans des solutions de saccharose à 50, 60, et 70 °Brix et à 35, 45, et 55°C. Par la suite, les effets de l'épaisseur des tranches (4, 6, et 8 mm) et de la vitesse de solution (0; 0,05; et 0,1 m S-1) sur la DO de la tomate ont été étudiés dans une solution de saccharose à température et concentration constantes (35 °C et 70 °Brix). Le poids de la tomate, le °Brix et la teneur en eau ont été mesurés en fonction du temps de traitement (20, 40, 80, 160 et 320 minutes). Les résultats ont démontré que les tranches de tomate de 4 mm déshydratées à une température de 35° C, une concentration de saccharose de 70 °Brix pendant 160 min avaient une composition semblable à celle de la pâte de tomate obtenue par évaporation, mais sans perte significative en caroténoïdes. Ces résultats suggèrent que la DO est un procédé prometteur qui pourrait remplacer l'évaporation dans l'industrie de transformation de la tomate.

Les influences de différents facteurs sur l'efficacité de la déshydratation osmotique des tomates ont été étudiées par l'expérience à facteur unique, à savoir la densité de la solution saline et de la solution de saccharose, le temps et la température de déshydratation osmotique; les influences de la déshydratation par pénétration et du processus de trempage du sucre sur les confits. Tomate ont été testés par l'expérience orthogonale. Pour découvrir le principe de la déshydratation osmotique pendant le processus de la tomate, et pour obtenir les conditions optimales de la transformation. Les résultats ont montré que la condition optimale était la déshydratation osmotique à 50 °C à 5% sel et solution de saccharose à 25% pendant 3 h, et bouillie à 60 °C dans une solution de saccharose à 60% pendant 10 min (**CHEN et al., 2010**).

Heredia et al., 2011 ont rapporté quelles conditions optimales de la déshydratation osmotique partielle de la tomate étaient soit une concentration en saccharose de 55 °Brix, une température de 30 °C et une durée de 120 min soit une concentration en saccharose de 27.5% mélangée à 10% de NaCl à 18 °C pendant 60 min.

Les conditions optimales permettant un maximum de perte en eau et de réduction du poids et un minimum de gain en solides au cours de la déshydratation osmotique des cubes de tomates dans une solution concentrée de saccharose et de sel ont été déterminés par **Ferradji et al., 2015**. Les paramètres opératoires de la déshydratation osmotique étaient la concentration de la solution osmotique (50-70 °Brix du sirop de saccharose ou 5-15 % de chlorure de sodium), la durée du traitement (60-240 minutes) et la température (35-55 °C). Les valeurs optimales de la déshydratation osmotique des tomates étaient une concentration de 60 °Brix et 5%, une durée d'immersion de 120 min et 240 min et une température de 55 °C et 55 °C respectivement dans une solution concentrée de saccharose et de sel.

L'effet de la température, du temps et de l'épaisseur de l'échantillon sur le procédé de la déshydratation osmotique de la tomate a été déterminé par **Correia et al., 2015**. Les conditions optimales permettant de réduire le maximum du poids de la tomate (146.31 g) étaient une durée de 35 à 44 h, une température de 52 à 67°C et une épaisseur des tranches de tomate de 15 à 27 mm. Lorsque la température a été ajustée à 60 °C, le temps de traitement a été significativement réduit.

Le procédé de déshydratation osmotique sous vide pulsé de la tomate a été étudié par **Jefferson et al., 2015**. Le transfert de masse a été amélioré dans ce procédé par rapport à la déshydratation osmotique conventionnelle. Dans cette étude, l'influence de la température, de la pression de l'impulsion du vide, de la concentration en chlorure de sodium et de la concentration en saccharose sur la perte d'eau, le gain en solides, la réduction de poids, l'activité de l'eau et la teneur en humidité des tranches de tomates a été déterminée. Les conditions optimales obtenues étaient une température de 40 °C, une pression de l'impulsion du vide de 56.25 mbar, une concentration en chlorure de sodium de 7,5% et une concentration en saccharose de 32,5%. Dans ces conditions, les valeurs maximales de la perte en eau et en poids de la tomate étaient respectivement de 42.2 et 36.1%, alors que les valeurs minimales du gain en solides, l'activité de l'eau et la teneur en humidité étaient respectivement 4.0, 0.948 et 76.5 kg d'eau/100 kg d'échantillon.

Escher et al., 2016 se sont intéressés à l'évaluation de l'effet des paramètres opératoires du procédé de la déshydratation osmotique sur la teneur en lycopène de la tomate de la variété *Ap*. Dans ce procédé, les tomates ont été déshydratées par osmose dans des solutions préparées avec différentes concentrations de chlorure de sodium (0–10%) et de saccharose (3.96–56.04%). Les tomates ont été immergées dans la solution osmotique durant 12.8, 40.0,

125.0, 210.0 et 267.8 min à température ambiante dans une boîte en polypropylène. Le rapport échantillon: solution utilisé était de 1: 3 (p/p). Les conditions optimales de la déshydratation osmotique conduisant à la meilleur teneur en lycopène de la tomate (144.8 6 14.95 (mg/g) étaient une concentration de la solution osmotique de 15.5% (2.2% de chlorure de sodium et 13.3% de saccharose) et un temps d'immersion de 12.8 min.

CHAPITRE 3

Séchage

CHAPITRE 3: Séchage

3.1. Définition du séchage

Le séchage est défini comme étant l'une des méthodes de stockage, qui tend à augmenter la durée de conservation d'un aliment, tout en préservant sa qualité nutritionnelle. Le séchage est le processus d'élimination de l'humidité dans un produit jusqu'à une valeur constante par évaporation (**Li et al., 2011**).

L'efficacité de la technique de séchage est mesurée à deux niveaux : les coûts d'exploitation et la qualité du produit fini. Dans de nombreux cas, le temps de séchage devient important car la vitesse de production. Cependant, le temps est moins important en cas de comparaison et les valeurs biologiques d'un produit alimentaire ou d'un médicament est une exigence (**Hammouda et Mihoubi, 2014**). La température de séchage et le temps de séchage dépendent l'un de l'autre et sont les caractéristiques les plus importantes pour déterminer un bon processus (**Masson, 2014**). Les objectifs du séchage sont depuis de réduire les coûts de conditionnement, de stockage, de manutention et de transport, prolonger la disponibilité en dehors des saisons et fournir une gamme de produits pour les consommateurs (**Moses et al., 2014**).

3.2. Principe de séchage

Le séchage est une opération consistant à retirer une partie du solvant d'un corps, par vaporisation de ce solvant, le produit final dit « sec » étant obtenu sous une forme solide de taille variable, éventuellement de « solide divisé » ou de poudre. Le produit passe ainsi d'un état initial dit « humide », selon le cas solide ou liquide, jusqu'à un état final dit « solide sec », même s'il contient encore une teneur en eau (ou solvant) résiduelle.

Le solvant considéré est le plus souvent l'eau, et nous ne présenterons ici que le séchage de l'eau, les mêmes principes pouvant s'appliquer à d'autres solvants, organiques par exemple, mais en prenant les propriétés associés à ce solvant (chaleur latente de vaporisation, isothermes de sorption, ect).

Le séchage est une opération de « séparation thermique », dans le sens qu'il faut fournir l'énergie de vaporisation du solvant, pour qu'il quitte le produit sous forme de vapeur. En séchage, on devra donc s'intéresser à la fois aux transferts de matière et de chaleur couplés.

Diverses techniques existent pour séparer l'eau d'un produit, qui ne suppose pas forcément sa vaporisation-pressage, égouttage, essorage centrifuge, etc. Et qu'on appellera d'une façon générale « déshydratation ». Le séchage est donc une technique particulière de déshydratation, le terme séchage étant réservé au cas de la séparation par vaporisation du solvant. La concentration thermique d'un liquide dans un évaporateur est aussi une séparation par vaporisation du solvant, mais adaptée au cas des produits initialement liquides (et non pas des solides humides), et qui doivent rester « pompables » dans le procédé, donc sans aller jusqu'au solide sec final, ce qui distingue la concentration du séchage (**Vasseur, 2009**).

3.3. Objectif de séchage

Le séchage est un procédé très ancien de conservation des produits agricoles et alimentaires. Son objectif est de convertir des denrées périssables en produits stabilisés, par abaissement de l'activité de l'eau (a_w) jusqu'à une valeur inférieure à 0,5. L'opération de séchage peut être considérée comme une opération de formulation ou de texturation, qui est lorsqu'elle est convenablement conduite, est capable de fournir des produits nouveaux, faciles d'emploi (**Bonazzi et Dumoulin, 2011**).

Parmi les intérêts de l'utilisation du séchage dans les industries agroalimentaires IAA :

- ❖ Augmenter la durée de conservation des produits.
- ❖ Stabiliser les produits agricoles (maïs, riz, lait, ...), et les coproduits industriels (farines de viande et de poisson, ...).
- ❖ Produire des ingrédients ou des additifs pour une seconde transformation, également appelés produits alimentaires intermédiaires (PAI).
- ❖ réduire considérablement la masse et le volume des produits, ce qui facilite leur transport, stockage et manutention (**Bonazzi et Dumoulin, 2011**).

3.4. Mode d'apport de la chaleur

On peut distinguer divers procédés de séchage (**Schnell, 1983**)

- Les procédés mécaniques (décantation et filtration, centrifugation, compression).
- Les procédés thermiques, par élévation de température et diminution de la pression de vapeur et de la phase gazeuse.
- Les procédés chimiques, par l'utilisation des produits déshydratants (acide sulfurique H_2SO_4 , acide phosphorique H_3PO_4).

Durant le séchage, la chaleur est transférée au produit selon trois mécanismes (**Bimbenet et al., 2002**) :

- Par conduction : le produit humide est en contact direct avec une surface chaude
- Par convection :
 - à partir de la vapeur d'eau surchauffée ou d'un liquide non miscible à la vapeur d'eau. Il s'agit d'un séchage par ébullition.
 - à partir d'un gaz vecteur de chaleur. Dans ce cas, le gaz sert aussi de vecteur à la vapeur d'eau. C'est un séchage par entraînement.
- Par rayonnement : le produit est exposé à un rayonnement infrarouge ou microondes.

La conduction peut permettre une chauffe rapide du produit quand celui-ci est sous forme de couche mince (cas du séchage sur cylindre). Le plus souvent cependant, les trois mécanismes d'apport de chaleur se combinent les uns aux autres. C'est ainsi, par exemple, que la conduction et le rayonnement peuvent s'ajouter, de façon intentionnelle ou parasitaire, à la convection, dans le cas de séchage par entraînement (**Bimbenet, 1984**).

3.5. Le choix du procédé de séchage

Les types des séchoirs utilisés pour sécher un produit donné est basé sur le choix de l'appareil adéquat qui se fait alors en fonction de certains facteurs (**McCabe et al., 1985**).

- La nature du produit (liquide, solide, pâte).
- Le taux d'humidité finale et initiale.
- Débit de produit exigé.

- Sensibilité de produit vis-à-vis de la chaleur.
- Sécurité de l'opération (toxicité, inflammabilité,...).

3.6. Méthodes de séchage

On peut utiliser différents modes de séchage pour extraire l'eau d'un produit.

3.6.1. Séchage par ébullition

Le séchage par ébullition à transmettre au produit amené à sa température d'ébullition un flux thermique au travers d'une surface d'échange de chaleur latente. De la même manière que pour l'évaporation sous vide, l'évaporation de l'eau est dans ces conditions directement proportionnelle à l'apport d'énergie (chaleur latente de vaporisation) réalisé. En pratique, cet apport est effectué par conduction à travers la surface d'échange au contact du produit par la vapeur dont la température est comprise entre 130 et 150 °C. selon la loi de Fourier, le transfert de chaleur d'effectue de façon proportionnelle à la différence de température entre le fluide caloporteur (dont la température est en principe constante) et le liquide en ébullition à la pression considérée (**Schuckel *al.*, 2012**). L'ébullition proprement dite s'observe difficilement dans les solides ou les corps pâteux que les liquides (**Perkin, 1980 ; Jean, 2011**).

3.6.2. Séchage à l'air libre

Cette méthode est la plus ancienne et elle est utilisée jusqu'à nos jours. Elle est basée sur un transfert de l'eau de la matrice voulue séchée vers l'air ambiant. En effet, une faible humidité relative de l'air correspond à une température élevée, ce qui lui confère une plus grande capacité d'entraînement de l'humidité. Ainsi l'augmentation de la température de l'air ambiant est sans effet sur sa teneur en vapeur d'eau, mais les variations de température dans une matrice hydratée aura une incidence sur le contenu en vapeur d'eau de cette dernière (**Hossain *et al.*, 2003**).

3.6.3. Séchage par micro-onde

Lors de séchage par micro-ondes, le produit est exposé à des ondes électromagnétiques à très haute fréquence. le transfert de ces ondes vers le produit est similaire au transfert de la chaleur rayonnante. les avantages de l'utilisation de l'énergie des micro-ondes sont la qualité de pénétration, qui permet un chauffage uniforme des matériaux sur lesquels le rayonnement frappe, l'absorption sélective du rayonnement par l'eau liquide et la capacité de contrôle facile, de sorte que le chauffage peut être rapide si on le souhaite (**Dikbasan, 2007**).

3.6.4. Séchage à l'étuve

Dans le cas du séchage par étuve, l'air apporte au produit une partie au moins de l'énergie nécessaire à la vaporisation ; et donc l'eau sera évaporée sans ébullition sous l'effet du gradient de pression partielle d'eau. La vapeur d'eau est transférée par conduction et convection du produit dans le milieu ambiant et est ensuite entraînée par le gaz (**Bonazzi et Bimbinet, 2003**). Il faut préciser la température de l'étuve, le temps, et la taille de l'échantillon à tester. Même si cette dernière n'est pas en général critique (**Vasseur, 2009**).

3.6.5. Séchage par entrainement

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

- le gaz apporte au produit une partie au moins de l'énergie nécessaire à la vaporisation

-l'eau est évaporée sans ébullition sous l'effet du gradient de pression partielle d'eau. La vapeur d'eau est transférée par conduction et convection du produit dans le milieu ambiant et elle est ensuite entraînée par le gaz (**Bonazzi et al., 2008**).

3.6.5.1. Activité de l'eau dans un produit

L'activité de l'eau (a_w) représente l'eau disponible (eau libre) pour la réalisation des réactions métabolique, en particulier pour les réactions enzymatiques. En effet, pour être actives, les macromolécules doivent être dans un état hydraté (**Branger, 2007**).

C'est le rapport entre la pression de vapeur d'eau à la surface du produit à une température donné et la pression d'eau pure à la même température. Cette activité de l'eau est

égale à l'humidité relative de l'air en équilibre avec l'aliment divisée par cent (100) (**Gilbert et al., 2006 ; Sahu et Tiwari, 2007**).

$$a_w = \frac{P}{P_e} = \frac{\text{HRE}(\%)}{100}$$

P = pression partielle de la vapeur d'eau dans l'aliment.

P_e = pression de vapeur de l'eau pure à la même température.

HRE = humidité relative d'équilibre en pourcentage(%).

a_w = activité de l'eau.

L'activité de l'eau dépend de la composition, de la température et de la quantité d'eau présente dans le produit. Sa valeur influence certaines caractéristiques qualitatives du produit telles que les caractéristiques biologiques et organoleptiques. Elle influence aussi la croissance des micro-organismes (**Jannot, 2003**). L'activité de l'eau donne une bonne indication de la stabilité du produit alimentaire en tenant compte de la croissance microbienne. Des activités enzymatiques et non enzymatiques. Cependant, pour qu'un produit alimentaire se conserve, son activité de l'eau doit généralement être en-dessous de 0.6. En dessous de ce seuil, le produit alimentaire est stable microbiologiquement et est classé comme déshydraté (**Jannot, 2003**).

L'eau contenue dans un bioproduit peut donc être considérée comme étant formée de :

- L'eau « libre » : c'est l'eau retenue par l'effet capillaire dans les pores des aliments, l'eau liée par l'effet osmotique, l'eau d'hydratation des macromolécules et l'eau en tant que solvant. L'eau libre reste mobile au sein du produit et conserve toutes les propriétés de l'eau pure. C'est l'eau disponible
- L'eau « liée » : elle forme une couche mono moléculaire étroitement associée par divers types de liaisons aux protéines et aux glucides. cette eau est fixe, elle échappe, par exemple, à la congélation parce que les interactions eau-macromolécules sont plus fortes que celles des molécules d'eau cristallisées entre elles. Cette eau n'est pas disponible (**Frénot et al., 2001**).

3.6.5.2. Définition La teneur en eau

La teneur en eau d'un matériau est le rapport du poids d'eau contenu dans ce matériau au poids du même matériau sec. On peut aussi définir la teneur en eau comme le poids d'eau W contenu par unité de poids de matériau sec (**GHOMARI et Bendi-ouis, 2008**).

$$W = \frac{E}{P_s} = \frac{Ph - P_s}{P_s}$$

E : poids d'eau dans matériau.

P_s : poids du matériau sec.

Ph : poids du matériau humide.

Si W est exprimé en % :

$$W\% = 100 \frac{Ph - P_s}{P_s}$$

3.6.5.3. Isothermes de sorption

L'activité de l'eau a_w dans un produit dépend principalement de sa teneur en eau X et de sa température T . la courbe représentant pour une température T donnée en eau X d'un produit en fonction de la valeur de l'eau a_w ou de l'humidité relative de l'air en équilibre HR est appelée :

- Isotherme d'adsorption si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit sec.
- Isotherme de désorption si elle e été déterminée expérimentalement en partant d'un produit saturé en eau.

Les deux courbes sont en général différentes (figure 6) car le séchage d'un produit (passage de $a_w = 1$ à $a_w < 0,6$) entraîne des modifications de structure et de porosité irréversible.

La connaissance de l'isotherme de désorption est partiellement important en vue du séchage d'un produit par entrainement : produit placé dans un courant d'air chaud et sec à T_a , HR_a . La connaissance de l'isotherme de désorption permet de calculer la teneur en eau d'équilibre X_{eq} du produit avec l'air de séchage qui est la limite vers laquelle va tendre la

teneur en eau X du produit en fin de séchage. La valeur de X_{eq} est un paramètre qui apparaît en particulier dans les modèles permettant de prévoir l'évolution de la teneur en eau d'un produit au cours de son séchage (Jannot, 2003).

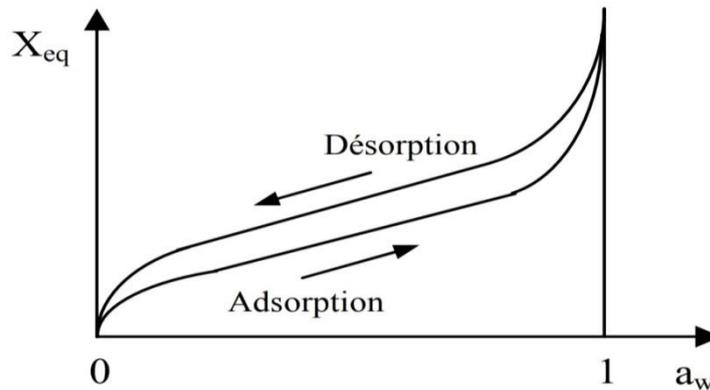


Figure 6 : Allure générale des isothermes de sorption (Jannot, 2003).

Les courbes d'adsorption et désorption (processus de séchage) ne suivent pas la même allure ; ce phénomène est appelé "hystérésis". Pendant le séchage les capillaires se ferment, pour les recouvrir, il faut une pression partielle de l'eau plus élevée (Nout et al., 2003).

3.7. Stabilité des produits biologiques

L'importance de l'activité de l'eau pour la stabilité des denrées alimentaires lors des traitements et entreposage est illustrée, de manière très évidente ci-après. Généralement, on note qu'une stabilité optimale est obtenue lorsque l' a_w est situé entre 0.2 et 0.3 (Hmid, 2013).

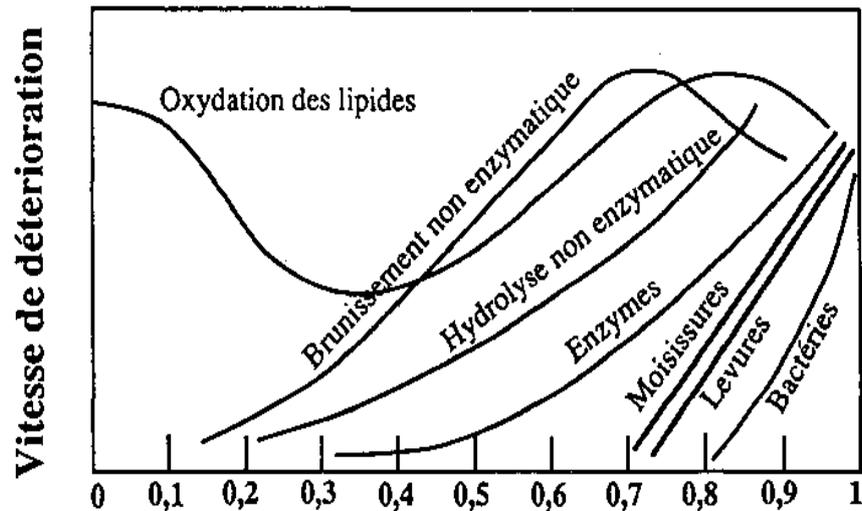


Figure 7 : vitesse de détérioration relative des aliments en fonction de l'activité de l'eau (Schuck, 2012).

3.8. Mécanismes d'élimination de l'eau

On peut éliminer l'eau par deux types de moyens :

-moyens mécaniques : décantation, centrifugation, ultrafiltration, osmose inverse.

-moyens thermique : évaporation.

Par évaporation partielle, on obtient un produit liquide ou pâteux, c'est la concentration.

Par évaporation totale, on obtient un produit solide, c'est le séchage.

Dans ce paragraphe, seule l'élimination d'eau par voie thermique sera abordée.

L'évaporation de l'eau met en œuvre deux types de transfert : transfert de chaleur (externe puis interne), transfert de matière (interne puis externe):

- 1) Transfert de chaleur externe de la source de chaleur vers la surface du produit.
- 2) Transfert de chaleur interne de la surface vers le cœur du produit.
- 3) Transfert de masse interne du cœur vers la surface du produit.
- 4) Transfert de masse externe de la surface du produit vers le milieu extérieur.

Si a_w est inférieur à 0.4, la croissance des microorganismes s'arrête et les réactions biochimiques telles que le brunissement enzymatique sont ralenties.

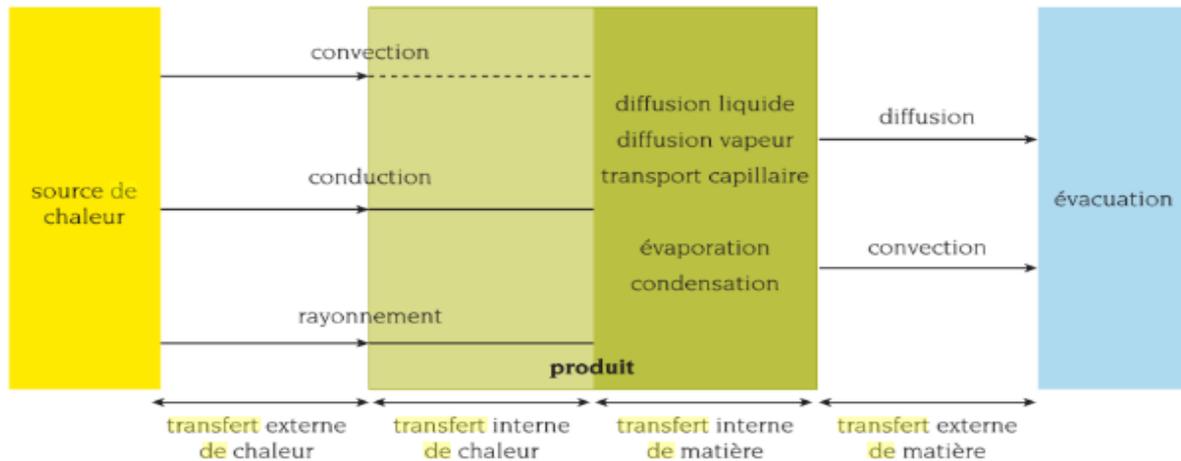


Figure 8 : Transfert de chaleur lors de l'évaporation de l'eau (Bimbenet et al., 2002).

3.8.1. Principe

On distingue :

- **l'élimination d'eau par ébullition** : le produit est chauffé à la température d'ébullition de l'eau qu'il contient pour provoquer sa vaporisation, puis la vapeur d'eau est séparée du produit.

La température d'ébullition dépend de la pression de l'installation (elle baisse avec la pression) et de l' a_w du produit (elle augmente au cours de la concentration quand l' a_w diminue).

- **l'élimination d'eau par entraînement** : de l'air chaud et sec (température élevée et humidité relative faible) entraîne l'humidité du produit par différence de pression partielle de vapeur d'eau. L'eau du produit migre alors vers l'air sous forme de vapeur sans avoir subi d'ébullition (Branger et al., 2007).

3.9. Cinétique de séchage

Quelle que soit la nature du produit et l'opération de séchage adoptée, l'étude expérimentale de la cinétique consiste à placer le produit dans un courant d'air parfaitement maîtrisé en termes de température, humidité et vitesse et à noter le changement de sa masse au cours du temps. D'autres techniques sont envisageables (analyse de l'humidité résiduelle dans le produit ou l'humidité de l'air sortant notamment) (Kemp et al., 2001).

L'étude expérimentale de la cinétique de séchage permet de caractériser le comportement d'un produit alimentaire donné au cours de sa déshydratation par les courbes illustrées dans la figure (9).

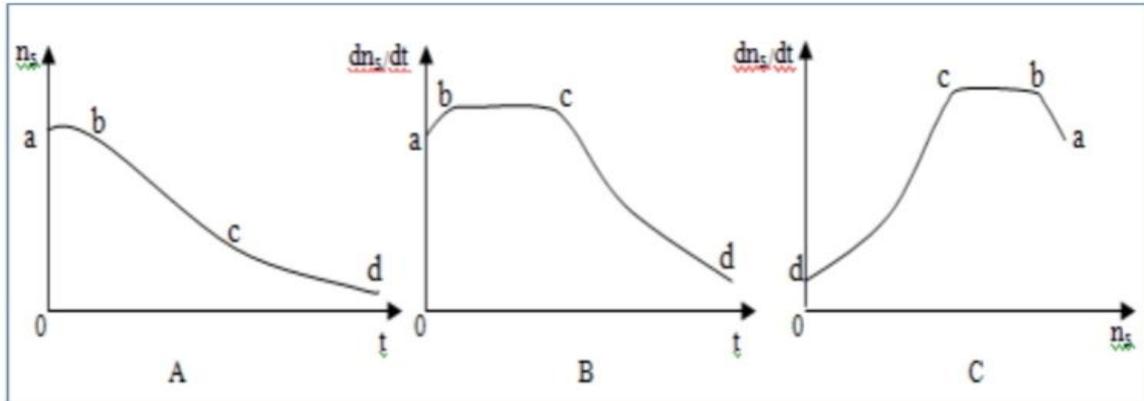


Figure 9 : Courbes d'évolution type au cours du temps de la teneur en eau du produit (A), l'allure de séchage (B) et l'allure de séchage en fonction du taux d'humidité (C)(Charreau et Cavallé, 2003).

Les courbes types utilisées pour décrire l'évolution du produit (figure 9) au cours du séchage sont:

- Le taux d'humidité du produit (n_s ou X) en fonction du temps (t), on obtient une courbe de séchage dont la forme la plus complète (c'est-à-dire lorsque toutes les phases de séchage existent) est donnée sur la figure [9(A)].
- L'allure de séchage (dn_s/dt ou dX/dt) en fonction du temps (t), on peut obtenir une nouvelle courbe qui est donnée sur la figure [9(B)].
- L'allure de séchage (dn_s/dt) en fonction du taux d'humidité (n_s) conduit à la courbe représentée sur la figure [9(C)].

3.9.1. Périodes de séchage

« Habituellement », quelle que soit la forme de la courbe adoptée, de nombreux auteurs (Bonazzi et Bimbenet, 2003) s'accordent à comparer les courbes expérimentales ainsi obtenues à une courbe « idéale » à trois périodes :

- **Phase 0** de mise en régime du produit : plus les dimensions du produit sont faibles, plus la durée de cette période est courte pour disparaître pratiquement lorsque le produit se présente sous forme de fine particule.
- **Phase 1** de séchage à vitesse constante : Cette phase ne peut avoir lieu que dans la limite d'une évaporation superficielle, sans limitation par effet de diffusion, ni retrait, ni diminution de l'activité de l'eau à la surface. En plus, les conditions extérieures de température, vitesse et humidité de l'air doivent être maintenues constantes. Dans cette situation, il doit y avoir un débit permanent d'humidité du cœur vers la surface d'échange et le séchage n'est contrôlé que par transferts externes. Au cours de cette période, la température du produit est uniforme et égale à celle du thermomètre humide. La fin de cette période a lieu quand la teneur en eau du produit atteint une valeur dite teneur critique.
- **Phase 2** de séchage à vitesse décroissante : Il suffit qu'une (ou plusieurs) des conditions citées en « Période 1 » ne soient plus assurées pour la vitesse de séchage décroît. Cette période peut donc être due à une situation pour laquelle les transferts internes de matières deviennent assez faibles pour devenir les processus limitants de l'ensemble de l'opération ; comme généralement la diffusivité thermique est nettement supérieure à la diffusivité de l'eau liquide au sein de la matière, cette période peut traduire une diffusion qui n'assure plus la fourniture de la surface d'échange en quantités suffisantes d'humidité à partir du cœur du produit. Mais d'autres facteurs pourront être à l'origine de cette période à vitesse décroissante. Ainsi si la surface d'échange diminue (en raison du phénomène de retrait), si l'humidité de l'air augmente, ou sa température diminue, ou l'activité de l'eau A_w à la surface du produit diminue et malgré une augmentation de la température du produit ... la vitesse de séchage diminue.
- **Phase 3** : Avec la présence de plus en plus prépondérante du processus de transfert de l'eau sous forme de vapeur, et en raison de la présence de l'étape paradoxale impliquant une cinétique fortement faible de type de front progressif, une diminution considérable de la vitesse de séchage a lieu. La teneur en eau peut continuer à diminuer jusqu'à atteindre une valeur limite d'équilibre qui dépend des conditions de l'air de séchage (T_a , W_a) et des propriétés spécifiques thermodynamiques de la matière.

3.9.2. Influence de paramètre de l'air sur la cinétique de séchage

On distingue plusieurs d'influence des paramètres de l'air (Touati, 2001) :

3.9.2.1. Influence de la température de l'air

La température de l'air asséchant influe considérablement sur la vitesse de séchage. Cette Influence est due à l'apport de chaleur au produit qui croît avec la température de l'air. Elle est aussi à la température du produit qui est d'autant plus importante que la température de l'air élevée. Par conséquent, les conductivités de l'eau dans le produit deviennent importantes.

3.9.2.2. Influence de l'humidité de l'air

La teneur en eau de l'air, joue un rôle important sur le comportement des cinétiques de séchage de certains produits, il semble que cette influence est plus importante au début de séchage et diminue lorsque la température de l'air augmente.

3.9.2.3. Influence de la vitesse de l'air

La vitesse de l'air influe effectivement sur la cinétique de séchage surtout au début de l'opération. Cependant, pour des produits dont la cinétique de séchage est contrôlée par le transport interne de l'eau, Influence de la vitesse de séchage de l'air devient très faible.

3.10. Qualité des produits séchés

L'efficacité d'une technique de conservation (séchage) se mesure à deux niveaux (albitar, 2010).

- Qualité du produit (hygiénique, nutritionnelle, praticité, sensorielle comme flaveur, couleur, texture...).
- Performance du procédé en termes de consommation d'énergie, cinétique, coût d'équipement et coût total ainsi qu'en termes du contenu environnemental.

Comme toutes les méthodes de préservation thermique des produits, l'utilisation du séchage présente des avantages et des inconvénients.

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 (**fourrier, 2003**).

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

- des modifications irréversibles de texture et donc de capacité à la réhydratation, des pertes de constituants volatils.
- la modification de la répartition de l'humidité dans le produit.
- Il est coûteux, notamment en énergie. Il est utile alors de connaître tout ce qui peut influencer le séchage et en particulier la vitesse de séchage afin de diminuer le coût de cette opération (**Nguyen, 2015**).

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 (**Ekechukwu et Norton, 1999**).

3.11. Types de séchoirs alimentaires

Il existe très grande diversité de types de séchoirs, presque aussi grande que celle des produits à sécher. Les débits de produits à sécher et leurs temps de séjour dans le séchoir sont aussi extrêmement différents, allant de quelques kilogrammes à plusieurs tonnes par heures, le produit étant sec en une fraction de seconde, où plusieurs dizaines de jours (**Bonazzi et Bimbenet, 2008**).

Les séchoirs, utilisés dans les IAA peuvent être classés selon divers critères :

- Le principe de séchage (entraînement/ébullition).
- Le mode d'apport de la chaleur.
- Le temps de séjour du produit.
- Le mode de manipulation de produit (solide, liquide, pâteux).

Les principaux types sont schématisés sur la figure 10. Quant aux caractéristiques techniques et application des principaux types de séchoirs, elles sont résumées dans le tableau 4.

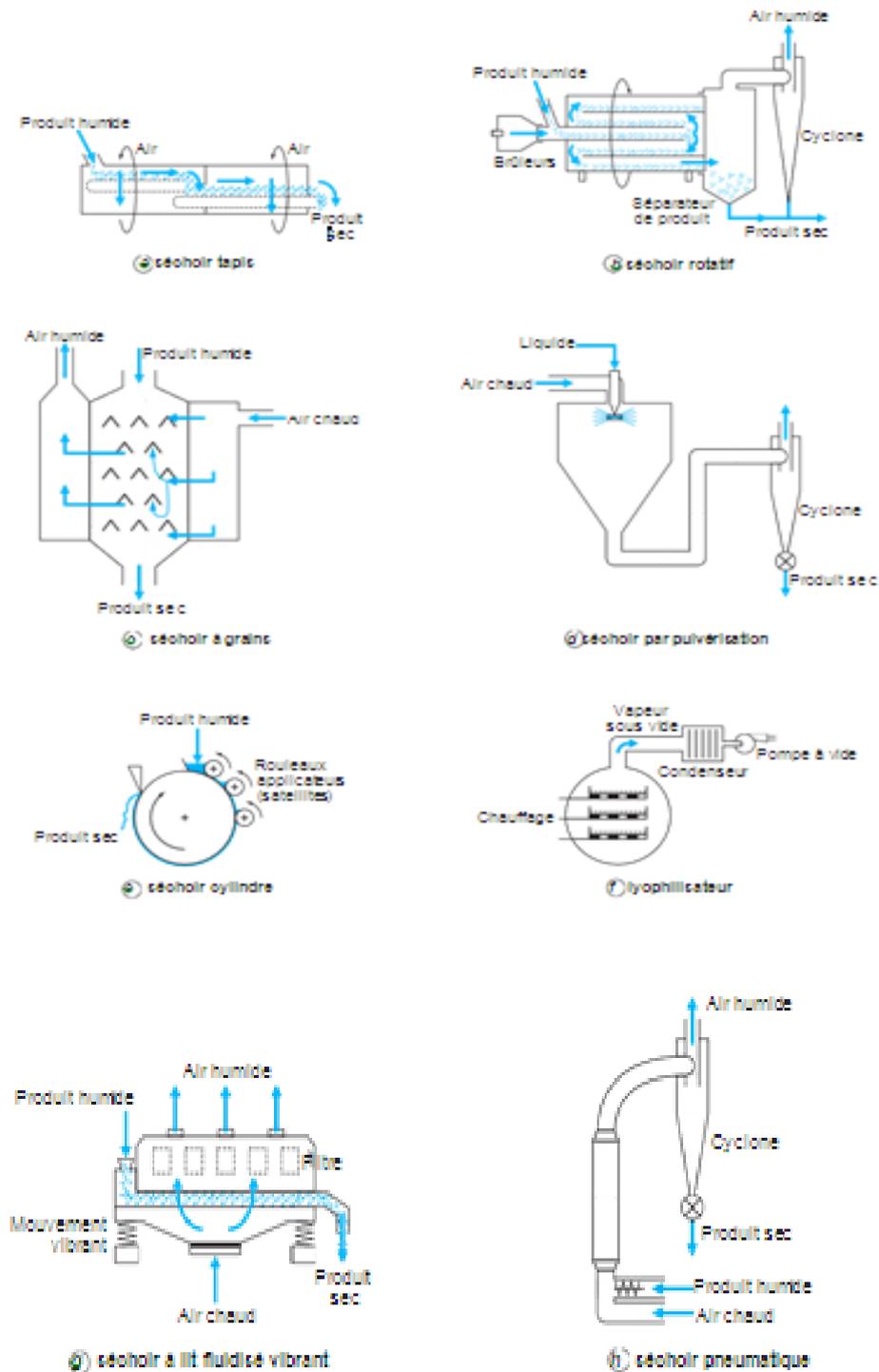


Figure 10 : Schémas de quelques types de séchoirs

Tableau 4 : Caractéristiques techniques et applications des principaux types de séchoirs

Type de séchoir	Variantes	Températures de fonctionnement	Temps de séjour	Capacité de traitement	Applications
Étuve	<ul style="list-style-type: none"> • chariots • séchage +fumages 	< 70 – 80 °C	<ul style="list-style-type: none"> • 30mn à qq. heures, voire qq. jours 	<ul style="list-style-type: none"> • Très variable selon les produits 	Fruits, légumes, viandes, poissons
Tapis	<ul style="list-style-type: none"> • tapis agencés en série, ou superposés 	<ul style="list-style-type: none"> • 30 à 250°C • ajustable selon le produit, • refroidissement en fin de séchage 	<ul style="list-style-type: none"> • qq.s à qq. mn, voire qq. heures 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 à 50 kg eau · h⁻¹ · m⁻³ de séchoir 	Fruits et légumes, herbes et plantes médicinales, gélatine, pulpe de betterave, biscuits
Tambour rotatif	<ul style="list-style-type: none"> • double ou triple passage 	<ul style="list-style-type: none"> • 600 à 900°C 	<ul style="list-style-type: none"> • 10 à 60mn 	<ul style="list-style-type: none"> • 60 à 80 kg eau · h⁻¹ · m⁻³ de séchoir 	Pulpe de betterave, fibres de maïs, pâtes alimentaires (autres que spaghettis), sucre
Séchoir pneumatique	<ul style="list-style-type: none"> • combinais on avec litfluidisé ou tambour rotatif 	<ul style="list-style-type: none"> • entrée : 100 à 350°C • sortie : 70 à 120 °C 	<ul style="list-style-type: none"> • ~ 1 s 	<ul style="list-style-type: none"> • 5 à 100 kg eau · h⁻¹ · m⁻³ de séchoir • dépend de la taille des particules 	Poudre d'amidon, farine, protéines, pulpe de betterave
Lit fluidisé	<ul style="list-style-type: none"> • litvibré • lit à échangeurs immergés • lit enfontaine 	<ul style="list-style-type: none"> • 50 à 200°C 	<ul style="list-style-type: none"> • 2 à 60mn 	<ul style="list-style-type: none"> • 30 à 200 kg eau · h⁻¹ · m⁻² (de sole) 	Levures, caséine, légumes, graines, poudres à post- sécher et/ou à agglomérer
Séchoir par pulvérisation	<ul style="list-style-type: none"> • avec lit (vibro-) fluidisé pour agglomération • avec lit fluidisé ou séchoir flash pour post-séchage • VES à la place de l'air 	<ul style="list-style-type: none"> • entrée : 100 à 600°C • sortie : 60 à 200 °C 	<ul style="list-style-type: none"> • 10 à 30s 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 à 30 kg eau · h⁻¹ · m⁻³ de séchoir 	Lait, lactosérum, café, thé, jus de fruits, levures
Cylindre chauffant	<ul style="list-style-type: none"> • bi-, ou multi-cylindres 	<ul style="list-style-type: none"> • 100 à 180°C 	<ul style="list-style-type: none"> • 3 à 30s 	<ul style="list-style-type: none"> • 15 à 40 kg eau · h⁻¹ · m⁻² de contact 	Flocons de pomme de terre, farines infantiles instantanées, soupes
Silo vertical	<ul style="list-style-type: none"> • dièdres • persiennes • grilleintérieure 	<ul style="list-style-type: none"> • 30 à 90°C 	<ul style="list-style-type: none"> • 6 h à 4 jours 	<ul style="list-style-type: none"> • 500 à 15 000 kg eau · h⁻¹ 	Maïs, blé tendre, orge, riz, pois protéagineux
Lyophilisateur	<ul style="list-style-type: none"> • À chariots • pulvérisation + lyo-philisation (café, thé, lait) (rare) • à pression atmosphérique 	<ul style="list-style-type: none"> • produit froid: – 10 à – 40 °C • Tmax en surface : 30 à 90 °C • P : 10 à 300Pa 	<ul style="list-style-type: none"> • 10 à 72h • (30 à 40 h, engénéral) 	<ul style="list-style-type: none"> • 0,1 à 0,5 kg eau · h⁻¹ · m⁻² de plateau 	Champignons, morceaux de fraises, oignons, herbes aromatiques, café

3.12. La modélisation du processus de séchage

3.12.1 La méthode des plans d'expériences (MPE)

Un plan d'expériences est une suite d'essais organisée à l'avance de manière à déterminer en un minimum d'essais et avec un maximum de précision l'influence de multiples paramètres sur une ou plusieurs réponses (**Goupy, 1996**).

Conditions d'application pour appliquer la méthode avec succès, il faut :

- Créer un groupe pluridisciplinaire constitué de personnes compétentes, concernées et motivées : ne pas oublier les expérimentateurs ;
- Associer un animateur formé à la méthode à un pilote, responsable technique du sujet traité ;
- Etre en mesure d'expérimenter, de maîtriser les valeurs à donner aux paramètres et de mesurer avec précision la ou les réponses. La méthode devient lourde à utiliser lorsque les paramètres pris en compte sont trop nombreux (néanmoins il est rare que plus de 15 paramètres influencent grandement les réponses du système) ;
- Etablir une stratégie expérimentale (série de plans) en fonction des objectifs fixés, des moyens disponibles et du délai accordé à l'étude ;
- Respecter scrupuleusement la démarche décrite ci-après.

La méthode des plans d'expériences (MPE) cherche à déterminer une relation entre 2 types de grandeurs :

- **La réponse** : Qui correspond à la grandeur physique étudiée.
- **Les facteurs** : Qui correspondent aux grandeurs physiques modifiables par l'expérimentateur et sensées influencer sur les variations de la réponse. La construction d'un plan d'expériences consiste à extraire du domaine expérimental, un nombre suffisant N de combinaisons particulières afin d'estimer, avec une incertitude à la fois minimale mais aussi homogène, les p inconnues du modèle (additif ou polynomial) tout en respectant au mieux les contraintes techniques et économiques de l'étude (**Goupy, 1999**).

3.12.2 La méthodologie des surfaces de réponses

La méthodologie de surfaces de réponses (MSR) est une technique largement utilisée pour optimiser divers processus. L'approche MSR a été développée par Box et ses collègues dans les années 1950, le principal avantage étant le nombre réduit d'expériences nécessaires pour évaluer plusieurs paramètres et leurs interactions (**Bruns et al., 2006; Ge et al., 2002**). Le

terme “Méthodologie de surfaces de réponses” est dérivé de la vue graphique créée après l'ajustement du modèle mathématique. La MSR décrit l'effet des variables indépendantes sur les variables dépendantes. En outre, l'approche génère également un modèle empirique. Avant d'entamer la discussion sur les principes et les applications de la MSR dans l'optimisation des processus alimentaires, il est nécessaire d'introduire et de clarifier certains termes importants. “Le domaine expérimental ”est le champ expérimental qui sera étudié, qui est défini par les limites maximale et minimale des variables indépendantes. “La conception expérimentale ”est un système spécifique d'expériences défini par une matrice créée avec les différentes combinaisons de niveaux des variables indépendantes. Les conceptions centrales composites, Box-Behnken et Doehlert sont des exemples de conceptions expérimentales. “Les variables indépendantes” ou “les facteurs” sont des variables d'entrée qui peuvent être modifiés indépendamment les uns des autres. “Les essais” sont des séries de tests qui forment une expérience. “Les variables dépendantes ” ou “réponses” sont des variables de sortie qui sont influencées par plusieurs variables indépendantes. “Résiduelle” est la différence entre le résultat expérimental et calculé pour un ensemble déterminé de conditions. Une valeur faible de cet indice est nécessaire pour un bon modèle mathématique ajusté sur des données expérimentales (**Bezerra et al., 2008**).

3.12.3 Les étapes de la MSR

L'optimisation au moyen de l'approche MSR pourrait être divisée en six étapes.

(1) sélection de variables indépendantes et réponses possibles, (2) sélection de la stratégie de conception expérimentale, (3) exécution des expériences et obtention des résultats, (4) ajustement de l'équation du modèle aux données expérimentales, (5) obtention de graphiques de réponse et vérification de le modèle (ANOVA), (6) la détermination des conditions optimales (**Witek-Krowiak et al., 2014**).

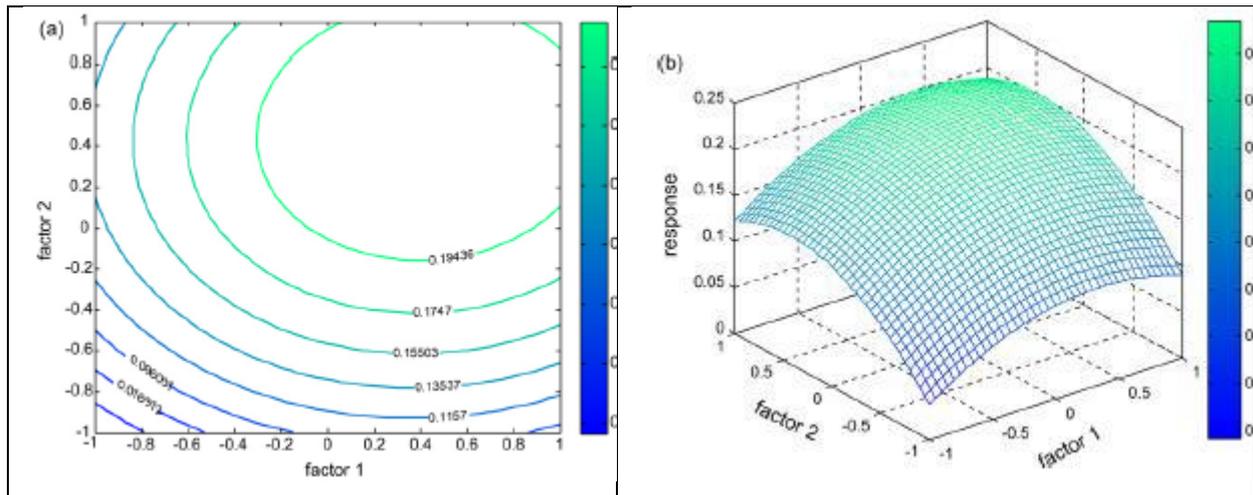


Figure 11: (a) tracé de contour 2D, et (b) tracé de surface de réponse 3D (Hamzi et Guenfis, 2015).

3.12.4 Exemples d'application de la méthodologie des surfaces de réponses

La méthodologie des surfaces de réponse n'a pas été beaucoup utilisée pour l'optimisation du séchage des fruits et légumes contrairement à celle de la déshydratation osmotique.

Dans le présent travail, nous avons essayé d'utiliser la MSR basée sur des recherches antérieures, même si elles sont peu nombreuses.

La méthodologie des surfaces de réponses a été appliquée par **Abano et al.**, (2012) pour déterminer les conditions optimales du procédé de séchage des tranches de tomates. Ainsi, le plan de Box-Behnken avec 17 essais a été utilisé pour évaluer les effets de la température de l'air (40°C à 60°C), de la vitesse de l'air (1.0 à 2.0 m/s) et de l'épaisseur de l'échantillon (7 à 11 mm) sur le temps de séchage, la teneur en lycopène, la teneur en acide ascorbique, le brunissement non enzymatique et la couleur des tranches de tomates séchées.

Des équations polynomiales de second ordre et des diagrammes de surface de réponse ont été obtenus après ajustement des modèles quadratiques par l'analyse de la variance (ANOVA). Les observations suivantes ont été notées:

- L'augmentation de la vitesse de l'air de 1.0 à 2.0 m/s a permis d'améliorer la teneur en lycopène et la teneur en acide ascorbique de la tomate et de réduire de manière significative le temps de séchage.

- L'accroissement de l'épaisseur de l'échantillon a amélioré de manière significative l'indice de brunissement non enzymatique et a réduit du temps de séchage et la teneur en acide ascorbique de la tomate. Néanmoins, aucune augmentation significative de la teneur en lycopène n'a été observée.
- Les conditions optimales du procédé de séchage de la tomate conduisant aux meilleurs réponses étaient une température de l'air de 44.26°C, une vitesse de l'air de 2.0 m/s et une épaisseur d'échantillon de 7.72 mm. Dans ces conditions optimales, les valeurs respectives du temps de séchage, de la teneur en lycopène, de la teneur en acide ascorbique, de la couleur et de l'indice de brunissement non enzymatique étaient respectivement de 527.346 ± 76.0639 min, 62.7003 ± 4.29765 mg/100g de matière sèche, 3.0717 ± 0.1412 mg/g de matière sèche, 62.9164 ± 2.1842 unité d'absorbance et 0.5506 ± 0.0657 unité d'absorbance.

La méthodologie des surfaces de réponse a été utilisée par **Coelho et al.**, (2012) pour évaluer l'effet des facteurs du procédé de séchage sur le taux d'humidité finale et la teneur en lycopène de la tomate (*Lycopersicon esculentum*). Les variables indépendantes de ce procédé étaient la température de l'air (60, 70 et 80 °C) et l'épaisseur de l'échantillon (3, 5 et 7 mm). Les conditions optimales du séchage permettant de maximiser les valeurs du taux d'humidité finale (13%) et la teneur en lycopène de la tomate ($47.7 \pm 0,2$ µg/g) étaient une température de 60 °C et une épaisseur de l'échantillon de 3 mm.

Janghu et al., (2014) ont mené une étude visant à déterminer l'effet de trois variables indépendantes du procédé de séchage (temps, température de l'air et épaisseur de l'échantillon) sur la teneur en lycopène des tranches de tomates. Un séchoir sous vide a été utilisé afin de minimiser les pertes en lycopène. L'optimisation de ce procédé a été effectuée à l'aide du plan de Box-Behnken. Les conditions optimales du procédé de séchage sous vide étaient une durée de traitement de 2 heures, une température de 80 ° C et une épaisseur de tranche de 7 mm. Les tranches de tomates déshydratées en fermaient une teneur en lycopène de 8.52 mg/100 g qui était proche de la valeur initiale trouvée dans les tomates fraîches.

Correia et al., (2015) ont évalué l'effet de la température de l'air, du temps de séchage et de l'épaisseur de l'échantillon sur la perte en poids de la tomate. Le séchage convectif adiabatique (isenthalpique) a été effectué dans cette étude. La méthodologie des surfaces de réponses utilisant le plan composite centré a été appliquée pour maximiser la perte en poids de

la tomate. Les conditions optimales obtenues lors du processus de déshydratation étaient d'une durée de 35 h, d'une température de 52 ° C et d'une épaisseur des tranches de tomates de 15 mm.

Obajemih *et al.*, (2018) ont développé un modèle empirique de type composite centré à l'aide du logiciel statistique Design Expert (version 6.0.6) afin d'améliorer le séchage convectif des tomates. Les variables réponses considérées dans cette étude étaient la vitesse de séchage, la teneur en vitamine C et le taux de protéines de tomate. Les variables indépendantes étaient la durée de la déshydratation osmotique (60-120min), la concentration en saccharose de la solution osmotique (40 à 60 °Brix) et la température de l'air de séchage (50-70°C). Les résultats de l'optimisation ont montré que les conditions favorables du procédé de séchage de la tomate étaient une durée de déshydratation osmotique de 120 min, une concentration en saccharose de 60 °Brix et une température de l'air de 60 °C. La vitesse de séchage, la teneur en vitamine C et le taux de protéines de la tomate obtenus dans ces conditions optimales étaient respectivement de 36.11 g/h, 37.89 mg / 100g et 19.55% respectivement.

La MSR a été appliquée par **Malakasa et al.**, (2019) en utilisant le plan factoriel de type composite centré à quatre facteurs indépendants et cinq niveaux (31 expériences) pour optimiser les paramètres opératoires du procédé de déshydratation osmotique couplé au procédé de séchage de la tomate (*Solanum lycopersicum esculentum*). Le logiciel Minitab (MINITAB, Inc., State College, PA) a été utilisé pour prédire les modèles quadratiques de surfaces de réponses. Cette étude visait spécifiquement à évaluer l'effet de la température de la solution osmotique (30-60 °C), de la concentration de la solution osmotique (100-300 g de sel de cuisine par litre), de la durée de la déshydratation osmotique (1-8 h) et de température de séchage (40-60 °C) sur la perte en poids, le temps de séchage, le rapport de perte en poids sur le temps de séchage et la teneur en eau finale de la tomate.

L'Analyse de variance (ANOVA) a montré que le chlorure de sodium était un excellent déshydratant de la tomate. La perte en poids, le temps de séchage, la teneur finale en eau de la tomate ont été affectées significativement par tous les paramètres de fonctionnement du procédé analysé. Cependant, la concentration et la température de la solution osmotique étaient les paramètres qui influencent le plus la perte en poids de la tomate au cours du procédé de couplage entre la déshydratation osmotique et le séchage. Par ailleurs, il s'est avéré

que la concentration de la solution osmotique et la température de séchage étaient les variables clés influençant le temps de séchage et la teneur finale en eau de la tomate.

Des modèles mathématiques pour prédire la perte en poids, le temps de séchage et la teneur finale en eau de la tomate, basés sur les 3 paramètres de fonctionnement, ont été proposés dans ce travail. Ces modèles permettent également de définir les conditions de traitement optimales en fonction des contraintes de ces processus. Les paramètres optimaux étaient une concentration en chlorure de sodium de 100 g/L, une température osmotique de 30 ° C, une durée de déshydratation osmotique de 8 h couplée à un séchage mené à 52.5 ° C. Les valeurs des réponses ainsi obtenues étaient un temps de séchage de 42 h, une perte en poids de la tomate égale à 96.71% et une teneur finale en eau de 14.51%.

La méthodologie des surfaces de réponses a été appliquée par **Obajemih** *et al.*, (2020) pour la conservation des propriétés organoleptiques des tomates séchées. Le plan expérimental de Box-Behnken à trois niveaux (-1, 0, 1) et quatre facteurs a été utilisé pour évaluer l'effet de la température de l'air de séchage (45- 65°C), de l'épaisseur des tranches (5- 10 mm), du type de cultivar (1 à 3) et de la nature du prétraitement (Acétate d'éthyle, MgCl₂-6H₂O + Na₂Cl, Miel + sucre) sur la différence de couleur et la valeur de l'angle de teinte. Dans cette étude, les conditions optimales du procédé de séchage de la tomate permettant d'obtenir les meilleurs valeurs de la couleur de l'angle de teinte (39.55°) et de la différence de couleur (33.64) étaient une température de l'air de séchage de 50°C, une épaisseur de tranches de 5.11 mm, un cultivar de type *Tiwantiwa* et un prétraitement constitué d'un mélange de miel et de solution de saccharose.

Conclusion

Conclusion

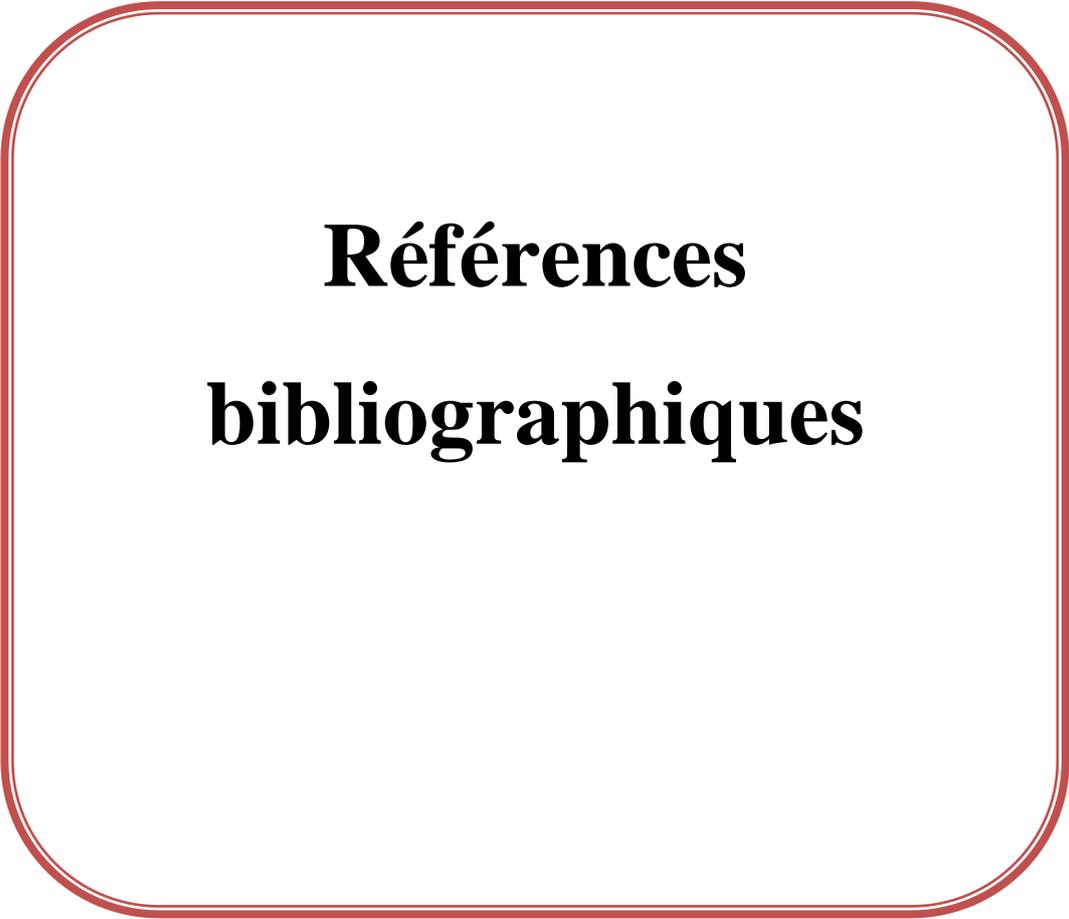
La présente étude avait pour objectif de prolonger la durée de conservation de la tomate de la variété *Agora* par couplage entre la déshydratation osmotique et le séchage, et aussi, d'optimiser les conditions opératoires du procédé de séchage convectif par la méthodologie des surfaces de réponses.

La méthodologie des surfaces de réponses est un outil important dans l'analyse mathématique et statistique du procédé de séchage par convection et l'amélioration de la qualité des produits. C'est une technique d'optimisation qui permet à l'expérimentateur de déterminer la relation entre les réponses et les variables indépendantes. Au cours de l'optimisation des procédés industriels, plusieurs variables de réponse décrivant les caractéristiques de qualité doivent être optimisés. Certaines de ces variables doivent être maximisées et d'autres doivent être réduites au minimum.

La méthodologie des surfaces de réponse a été utilisée pour déterminer les paramètres optimaux du procédé de séchage convectif des cubes de tomates déshydratés osmotiquement à une température de 55°C, une concentration en saccharose de 60°B pendant 120 min. L'application de la déshydratation osmotique en tant que prétraitement avant le séchage permet de réduire la consommation d'énergie et de préserver la qualité nutritionnelle et sensorielle des tomates séchées. En se basant sur les résultats antérieurs obtenus par les chercheurs, nous pouvons conclure que les conditions optimales du procédé de séchage par convection de la tomate conduisant à la plus faible teneur en eau (13%) et à la meilleure perte en poids (96.71%) étaient une durée de traitement de 2h et une température de séchage de 44.26 °C.

Enfin, il serait intéressant de compléter ce travail par d'autres études plus approfondies et nous préconisons comme perspectives:

- ✓ Effectuer des études sur la qualité organoleptique des tomates déshydratées ;
- ✓ Déterminer la teneur en lycopène des tomates déshydratées ;
- ✓ Evaluer l'aptitude à la réhydratation de la tomate séchée ;
- ✓ Etudier les propriétés technologiques et fonctionnelles de la poudre de tomate séchée ;
- ✓ Utiliser la poudre de tomate séchée pour assaisonner de nombreux plats cuisinés.
- ✓ Fabriquer une boisson énergétique naturelle à base de poudre de tomates séchées.



**Références
bibliographiques**

- A.N, Rodrigucs S, Gaspareto 0.C.P et Oliveira E.L.** (2006).Optimization or osmotic dehydration of papaya followed by air-drying, *Food research international*, 37, 492- 498.
- Abano E. E, Ma Het Qu W.** (2012). Optimization of Drying Conditions for Quality Dried Tomato Slices Using Response Surface Methodology. *Journal of Food Processing and Preservation*, 38(3), 996–1009.
- Abano E.E, Ma Het Qu W.**(2012).Influence of combined microwave-vacum drying on drying kinetics and quality of dried tomato slices.*J. food Qual.* 35(3), 159-168.
- Abano E.E, Ma Het QuW.** (2012).Optimization of dried tomato slices using response surface methodology. 38. 996-1009.
- Abouo V.N, Sadat A.W, Akmel C.D, Assidjo E.Net Amani G.N.**(2016). Impact of solar and microwave oven drying on a few chemical parameters of market value quality of fermented farasterio (*Theobroma Cacao L.*). *Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol.* 12(4), 402-406.
- Abud-Archila M.**(2008). Optimization of osmotic dehydration of yam bean (*Pachyrhizuserosus*) using an orthogonal experimental design. *J. Food Eng.*, **84**, 413-419.
- Ade-Omowaye B.I.O, Rastogi N.K, Angersbach A et Knorr D.** (2003).Combined effects of pulsed electric fierld pre-treatment and partial osmotic dehydration on air drying behaviour of red bell pepper.*Journal of Food Engineering*, 60, 89-98.
- Agnelli M.E, Marani C.M etMascheroni R.H.** (2005).Modelling of heat and mass transfer during (osmo) dehydrofreezing of fruits.*Journal of Food Engineering*, 69, 415-424.
- Albagnac P.G, Varoquaux J et Montigaudcoord C.I.** (2002). Technologies de transformation des fruits /Paris.-Londres.-New York : *Ed. Tec & Doc,cop.*-XXII-498 pages.
- Albitar N.** (2010). Etude comparative des procédés de séchage couplés à la texturation par Détente Instantanée Contrôlée DIC, en termes de cinétique et de qualité nutritionnelle. Applications à la valorisation des déchets agro-industriels. P.24 et 191.
- Alhagdow M.**(2006). Caractérisation fonctionnelle de la GDP-D-MANNOSE- 3,5-EPIMERASE ET GALACTONO-1,4-LACTONE DESHYDROGENASE, enzyme de la voie

de biosynthèse de la vitamine c chez la tomate. Thèse de doctorat .université de Bordeaux 1. 245p.

Aminzadeh R, Sargolzaei J et AbarzaniM. Preserving melons by osmotic dehydration in a ternary system followed by air-drying. *Food and Bioprocess Technology* 2012, 5(4), 1305–1316.

Andres A, Bilbao C et Fito P. (2004). Drying kinetics of apple cylinders under combined hot air–microwave dehydration. *Journal of Food Engineering*, 63, 71–78.

Application of response surface methodology and artificial neural network methods in

Baba Aissa F. (1999). Encyclopédie des plantes utiles, flore d’Algérie et de Maghreb. ed. librairie moderne, Rouiba : 278-279p.

Barat J.M.E, Chiralt A etFito P. (1998).Equilibrium in cellular food osmotic solution systems as related to structure. *Journal of Food Science*, 63 (5), pp. 836–840.

Baron V. (2010). Application de la deshydratation osmotique au confisage des fruits CIRAD.1.

Basu et Imrhan V. (2006). Tomatoes versus lycopene in oxidative stress and carcinogenesis: conclusions from clinical trials. *Eur J ClinNutr* 2006 August, 16, 55p.

Bazzano L et Serdula M. (2003).Dietary intake of fruits and vegetables and risk of cardiovascular disease. *CurrAtherosclerRep* 2003 November, 5 (6), 492-9p.

Bchir b, Besbes S, Attia HetBlecker C. Osmotic dehydration of pomegranate seeds (*Punicagranatum L.*): Effect of freezing pre-treatment. *Journal of Food Process Engineering*. In press (DOI: 10.1111/j.1745-4530.2010.00591.x).

Beedie M. (1995).Energy saving-a question of quality. *South African Journal of Food Science and Technology*, 48(3), 4.

Benkhelfellah R, EL Mokretar S, Miri R et Belhamel M.(2005). Sechoirs solaires. Etude comparative de la cinétique de séchage des produits agroalimentaires dans des modèles de type direct et indirect. In : 12th International Meeting on Heat transfer, pp. 259-262.

- Bernard C.** (2009). Etude de l'impact de la nutrition azotée et des conditions de culture sur le contenu en poly-phénols chez la tomate. Thèse de doctorat. Nancy Université-INRA Agronomie et Environnement. 265p.
- Bezerra M. A, Santelli R. E, Oliveira E. P, Villar L. S et Escaleira L. A.** (2008). Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta*, 76(5), 965–977.
- Bimbenet J.J, Duquenoy A et Trystram G.** (2002). Genie des procédés alimentaires des bases aux applications. Dunod.
- Bimbenet J.J.** (1984). Le séchage dans les industries agricoles et alimentaires (Cahier du GIA, SEPAIC.). Paris, France.
- Birlouez-Aragon I.** (2008). La réaction de Maillard dans les aliments : quels enjeux pour la santé humaine ? *Cahiers de Nutrition et de Diététique* **43**, 289-295.
- Bolin H.R, Huxsoll C.C, Jackson R et Ng K.C.** (1983). Effect of osmotic agents and concentrations on fruit quality. *Journal of Food Science*, 48, 202–205.
- Bonazzi C et Bimbenet J.J.** (2003). Séchage des produits alimentaires. Principes. Technique de l'ingénieur F3000, vol agroalimentaire.
- Bonazzi C et Dumoulin E.** (2008) : « Le séchage des produits alimentaires. » *Industrie Alimentaire Agricole* 125(03-04) : 12-22.
- Bonazzi C et Dumoulin E.** (2014). Quality Changes in Food Materials as Influenced by Drying Processes. *Modern Drying Technology*, 1–20.
- Bonazzi C et Bimbenet J.J.** (2003). Séchage des produits alimentaires principes. Techniques de l'ingénieur : Agroalimentaire : 2 F3000 :1-14.
- Bonazzi C et Bimbenet J.J.** (2008). Séchage des produits alimentaires : appareils et applications. Techniques de l'ingénieur. F3002.
- Boumendjel M.M, Houhamdi M.F, Samar H, Sabeg A et Boutebbu M.** (2012). Effet des traitements thermiques d'appertisation sur la qualité biochimique, nutritionnelle et technologique du simple, double et triple concentré de tomate. *Sci. Technol.* 36, 51-59.

- Bourgeois CM, Mescle JF et J. Z.** (1996). Microbiologie alimentaire. In *Aspect microbiologique de la sécurité et de la qualité des aliments* [The Documentation-Lavoisier, editor]. Paris, Londres, New-York, 1092 p.
- Branger A, Richer M.M et Roustel S.** (2007). Microbiochimie et alimentation, p.77.
- Branger A, Richer M.M et Rouste IS.** (2007). Alimentation et processus technologiques. P.184.
- Bruns R. E, Scarminio I. Set de Barros Neto B.** (2006). Statistical design-chemometrics (vol. 25): Elsevier.
- Castello M, Igual M, Fito P et Chiralt A.** (2009). Influence of osmotic dehydration on texture, respiration and microbial stability of apple slices (var. 'Granny Smith'). *J. Food Eng.*, 91, 1-9.
- Celma A.R, Rojas S, Lopez-Rodriguez F.**(2008). Mathematical modelling of thin-layer infrared drying of wet olive husk. *Chem. Eng. Process*, 47, 1810-1818.
- Chanforan C.** (2010). Stabilité de micro constituants de la tomate (composés phénoliques, caroténoïdes, vitamines C et E) au cours des procédés de transformation : études en systèmes modèles, mise au point d'un modèle stoechio-cinétique et validation pour l'étape unitaire de préparation de sauce tomate. Thèse de doctorat en Sciences, spécialité : chimie. Université d'Avignon. Pays de Vaucluse. 395 p.
- Charreau A et Cavallé R.** (2003). Séchage- Théorie et Calculs. Techniques de l'ingénieur, J2480 : Vol. Génie des Procédés.
- Chaux C et Foury C.** (1994). Productions légumières. Tome 3 – Légumineuses potagères, légumes fruits. Paris : Technique et documentation - Lavoisier.
- Coelho K, Costa B. R, et Pinto L. A. de A.** (2013). Evaluation of Lycopene Loss and Colour Values in Convective Drying of Tomato by Surface Response Methodology. *International Journal of Food Engineering*, 9(2).
- Coombe B.** (1976). The Development of Fleshy Fruits. *Annual Review of Plant Physiology*, 27:207- 228.

Correia A. F. K, Loro A. C, Zanatta S, Spoto M. H. Fet Vieira T. M. F. S. (2015). Effect of Temperature, Time, and Material Thickness on the Dehydration Process of Tomato. *International Journal of Food Science*, 2015, 1–7.

Cotte. (2000). Etude de la valeur alimentaire de pulpe de tomate chez les ruminants. Thèse pour l'obtention de grade de Docteur vétérinaire - Université Claude Bernard de Lyon1, P. 135.

Creff A-F. (2004). Manuel de diététique en pratique médicale courante, Masson ed, 301 p.

Dalla Rosa M, Pinnavaia G et Lerici C.R. (1982). Osmotic dehydration of fruit. II Laboratory experiments on different kinds of fruits. *Industria conserve* 57, 3-7.

Davies J. N et Hobson G. E. (1981). The constituents of tomato fruit--the influence of environment, nutrition, and genotype. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 15(3), 205-280

De Broglie L A et Guérault D. (2005). Tomates d'hier et d'aujourd'hui. Paris, Hoëbeke. 143.

Degrou A. (2013). Etude de l'impact des procédés de transformation sur la diffusion des caroténoïdes (cas du lycopène de la tomate). Thèse de doctorat, université d'Avignon et des pays de vaucluse. 191p. dehydration of fruits. *Food Technology*, 20, 125-128.

Dermesonlouoglou E.K, Pourgouri S et Taoukis P.S. (2008). Kinetic study of the effect of the osmotic dehydration pre-treatment to the shelf life of frozen cucumber. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 9, 542-549.

Dermesonlouoglou E. K, Pantelaiaki K, Andreou V, Katsaros G. J, et Taoukis P. S. (2019). *Osmotic pretreatment for the production of novel dehydrated tomatoes and cucumbers. Journal of Food Processing and Preservation*, e13968.

Dewanto V, Wu X, Adom K.K, Liu et R.H.(2002). Thermal processing enhances the nutritional value of tomatoes by increasing the total antioxidant activity. *J. Agric. Food chem.* 50, 3010-3014.

Dikbasan T. détermination of effective parameters for drying of apples. Microwave drying, p.19.

Doré CetVaroquaux F. (2006). Histoire et amélioration de cinquante plantes cultivées. Paris : INRA

Ekechukwu, O. V. et B. Norton. (1999). "Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology." *Energy conversion and management* 40(6): 615-655.

Espiard E. (2002). Introduction à la transformation industrielle des fruits. *TEC&DOC-Lavoisier*. pp. 181 - 182.

Fao.org/faostat.(2020).

Fernandes F, Rodrigues S, Gaspareto O. C. P et Oliveira E.L. (2006). Optimization of osmotic dehydration of papaya followed by air-drying. *Food Research International*,39, 492-498.

Ferradji A, Bouchareb M, Bouhous .N.E.H etMalek .A. (2016). Optimization of assisted ultrasound osmotic dehydration of strawberries slices in sucrose solutions using response surface methodology.

Ferradji A. (2015). 'Optimization of Osmotic Dehydration of Medlars Slices in Sucrose Solution Using Response Surface Methodology', *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, Vol. 5.128 - 134.

FerradjiA, AïtChaouche F.S, Belhachat D et Malek A. (2017). Optimisation de la déshydratation osmotique des tranches de carottes dans une solution de saccharose concentrée en utilisant la Méthodologie des Surfaces de Réponse.

Ferrari C et Hubinger M. (2008). Evaluation of the mechanical properties and diffusion coefficients of osmodehydrated melon cubes. *Int. J. Food Sci. Technol.*, **43**, 2065-2074.

Floury J, Le bail A et Pham Q.T. (2008). A three-dimensional numerical simulation of the osmotic dehydration of mango and effect of freezing on the mass transfer rates.*Journal of Food Engineering*, 85, 1-11.

Fourrier V. (2015). Conservation des aliments-séchage au soleil. Avantages et inconvénients. P.4.Nguyen : Étude expérimentale et modélisation du procédé de séchage des végétaux, Lorient.

Gallais A et Bannerot H. (1992). Amélioration des espèces végétales cultivées.

- Garcia-Martinez E, Martinezmonzo J, Camacho M.M et Martineznavarrete.**(2002). Characterization of reused osmotic solution as ingredient in new product formulation.*Food Research International*, 35, 309
- Garcia-Segovia P, Mognetti C, André-Bello A et Martinez-Monzo J.** (2010). Osmoticdehydration of Aloevera (*Aloeabarbadosensis*Miller).*J. Food Eng.*, 97, 154- 160.
- Ge Y, Ni Y, Yan H, Chen YetCai T.** (2002). Optimization of the supercritical fluid extraction of natural vitamin E from wheat germ using response surface methodology.*Journal of Food Science*, 67(1), 239–243.
- Génard R, Gautier M, Bénard L et Bertin A.**(2010). *Innovations Agronomiques*, 9 :47-57.
- Ghomari F et Bendi-ouis A.** (2008). *SCIENCE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION*.
- Giangiacoimo R, Torreggiani D etnAbbo E.** (1987). Osmotic dehydration of fruit. Part I: Sugar exchange between fruit and extracting syrup. *Jornal of Food Process and Preservation* 11, 183-195.
- Gilbert O, Méotl M, Marouzé C et Brouat J.**(2006).Low-cost device for constructing sorption isotherm. *Drying Technology* 24:1697-1704.
- Giovanelli G, Zanoni B, Lavelli V, et Nani R.** (2002). Water sorption, drying and antioxidant properties of dried tomato products.
- Goupy, J.** (1999). *Plans d’expériences pour surfaces de réponse*. Paris : Dunod, c1999 ISBN :2-10-003993-8.
- Goupy, J.** (1996).*La méthode des plans d’expériences – Optimisation du choix des essais et de l’interprétation des résultats*, Ed. Dunod.
- Grasselly D, Navez B, Letard M.** (2000). *Tomate, pour un produit de qualité*. 112.
- Graziela Bragueto Escher, Silvia Renata Machado Coelho et Divair Christ.** (2016). Optimization of Osmo-Convective Dehydration Process for Dry Tomato Production.
- Haems P.M.** (2013). *Vitamines*. Copyright Medical Web Services.8 p.

Hammouda I, et Mihoubi D. (2014). Comparative numerical study of kaolin clay with three drying methods: Convective, convective–microwave and convective infrared modes. *Energy Conversion and Management*, 87, 832–839.

Hamzi R, Guenfis A. (2015). Optimisation de l'extraction assistée par micro-ondes des composés phénoliques des graines de tomates par la méthodologie de surface de réponse. Thèse de Master, Université A. MIRA, Bejaia. 36 P.

Hawkes J et Flink J.M. (1978). 'Osmotic Concentration of Fruits Slices Prior to Freeze Dehydration', *Journal of Food Processing and Preservation*, Vol. 2, pp. 265 – 284.

Henauer J.J.F. (2008). Alimentation riche en fibres. L'importance des fibres pour les personnes souffrantes de paralysie page 3 Troisieme edition Française. 9 p.

Heredia A, Peinado I, Rosa E, Andrés A, et EscricheI. (2012). Volatile profile of dehydrated cherry tomato: Influences of osmotic pre-treatment and microwave power. *Food Chemistry*, 130, 889–895.

Hmid I. (2013). Contribution à la valorisation alimentaire de la grenade marocaine (*PunicaGranatum L.*) : caracterisationphysicochimique, biologique et stabilité de leur jus frais. P126.

Hossain MA, Bala BK et Satter MA. (2003). Simulation of natural air drying of maize incribs. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 11(7–8):571-583.

Huu Thuan. (2009). Déshydratation osmotique de la tomate: étude de la rétention des antioxydants et modélisation du procédé.

Janghu S., Ray A., Bansal V., et Kaushik R. (2014). Dehydration process optimization for maximum lycopene retention in tomato slices using response surface methodology. *Asian Journal of Dairy and Food Research*, 33(3), 204

Jannot Y. (2003). Isothermes de sorption: modèles et détermination. www.thermigue55.com/principal/sorption.pdf, consulté le 12-12-2008.

Jefferson L. G, Corrêa, Ariana Justus, Letícia F,de Oliveira et Guilherme E. (2015). Alves Osmotic Dehydration of Tomato Assisted by Ultrasound: Evaluation of the Liquid Media on Mass Transfer and Product Quality.

- Jiokap N.Y, Reynes M, Zakhia N, Raoult-Wack A.L et Giroux F.** (2002). Mise au point d'un procédé combiné de déshydratation imprégnation par immersion et séchage thermique d bananes (*Musa acuminatagroupeCavendish*), *Journal of Food Engineering*, **55**, 231-236. *Journal of Food Engineering*, 52, 135–141.
- Jouve JL.**(1996). *La Qualité microbiologique des aliments, Maîtrise et critères*: CNERNA - CNRS 394p.
- Kaur R., Ahuja A.K., Gupta B.K.**2004. Nutritional evaluation of fodder based total mixed ration. *Indian J. Anim. Nutr.* 21(1), 60-62.
- Kemp I.C, Fyhr B.C, Laurent S, Roques M, Groenewold C, Tsotsas E, Sereno A, Bonazzic, Bimbenet J et Kind M.** (2001). Methods for processing experimental drying kinetics data, *Drying Technology* 19(1), 15-34.
- Khama R., Aissani F., Alkama R., Bennaman L., Fraikin L, Salmon T., Plaugonven E., Leonard A,** (2016). Convective drying of cherytomato : study of skin effect. *J. Eng. Sci. technol.* 11(03), 443-457.
- Khatir A, Acheheb H, MalekA et Ferradji A.** (2013). Optimization of osmotic dehydration of orange pieces (*valencia late*) in sugar solution using response surface methodology.
- Khoualdia B, Benali S, HannachiA.** (2020). Pomegranate arils osmotic dehydration: effect of pre-drying on mass transfer.
- Kowalska H, Lenart A et Leszczyk D.** (2008). The effect of blanching and freezing on osmotic dehydration of pumpkin. *Journal of food engineering*, 86, 30-38.
- Krokida M.K, Karathanos V.T etMaroulis Z.B.** (2000).Effect of osmotic dehydration on colour and sorption characteristics of apple and banana. *Drying Technol.*, 18, 937-950.
- Krokida M.K, Kiranoudis C.T, Maroulis Z.B et Marinos-Kouris D.** (2000).Drying related apple properties of apple. *Drying Technology*, **18** 1251-1267.
- Kudra T.** (2009).Energy aspects in food dehydration.in: Cristina Ratti Ed. *Advances in food déhydratation*, CRC Press, NW, U.S.A. 423-443.
- Lazarides H.N, Gekas V et Mavroudis N.** (1997).Apparent mass diffusivities in fruit and vegetable tissues undergoing osmotic processing. *Journal of Food Engineering*, 31, 315-324.

- Lenart A et Flink J.M.** (1984a). Osmotic dehydration of potato. I. Criteria for the end point of the osmotic process. *Journal of Food Technology*, 19, 45-63.
- Lenart A.** (1996). Osmo-convective drying of fruits and vegetables: technologie an application. *Drying Technol.*, n.14.391-413.
- Lerica C.R, Pinnavaia T.G, Dalla Rosa M et Bartolucci L.** (1985). Osmotic dehydration of fruit: influence of osmotic agents on drying behaviour and product quality. *J. FoodEng.*, 50, 1217-1226.
- Lerici C.R, Pepe M et Pinnavaia G.** (1977). The osmotic dehydration of fruit. I. Results of laboratory experiments. *Industria. Conserve* 52, 125–129.
- Li Z, Raghavan G.S.V et Orsat V.** (2011). Temperature and power control in microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 97(4): 478-483.
- Lozano F.E, Rotstein E et Urbicain M.J.** (1983). Shrinkage, porosity and bulk density of soodstuffs at changing moisture contents. *Jornal of Food Science*, 48, 1497-1553.
- Malakasamandefu A.G., Mutambelhity D., Kizungavumilia R., etSumbuzola E.** (2019). Study of the coupling of osmotic dehydration and tomato (*lycopersicum esculentum*) drying by the response surface methodology. *International Journal of Food Science* 2019, 30-40.
- Maltinie et Torreggianid.** (2003). La déshydratation osmotique et les produits de semi-confisage. *LE SUCRE ET LA CONSERVATION DES PRODUITS À BASE DE FRUITS*. 32.
- Manaa S., Mounsi M., et Moumami N.** (2013). Solar drying of tomato in the acid area of TOUAT (Adrar, Algeria). *Energy Procedia*, 36, 511-514.
- Marcotte M, Toupin C.J et Le Maguer M.** (1991). Mass transfer in cellular tissues. Part I. The mathematical model. *Journal of Food Engineering*, 13, 199–220.
- Marsic N, Sircelj H et Kastelec D.** (2010). Lipophilic antioxidants and some carpometric characteristics of fruits of ten processing tomato varieties, grown in different climatic conditions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58: 390-397.
- Masson M. L.** (2014). Studies on Freeze-Drying of Foods. *Springer Briefs in Applied Sciences and Technology*, 19–28.

Matusek A et Merész P. (2003) .Modelling of sugar transfer during osmotic dehydration of carrots .Department of Biochemistry and Food Technology Budapest University of Technology and Economics.

Mavroudis N.E, Dejmek P et Sjöholm I. (2004). Osmotic treatment induced cell death and osmotic processing kinetics of apples which characterized raw material properties. *J. Food Eng.*, n.63.47-56.

Mayor L, Pissarra J et Sereno A. (2008). Microstructural changes during osmotic dehydration of parenchymatic pumpkin tissue. *J. Food Eng.***85**, 326-339.

MIHOUBI M. soutenue en (2012).la déshydratation osmotique de la pomme de terre. modelling and optimization of biosorption process. *Bioresource technology* 160, 150-160.

MoresiM et Liverotti C.(1982). Economic study of tomato paste production.

Moses J. A., Norton T., Alagusundaram K., et Tiwari B. K. (2014). Novel Drying Techniques for the Food Industry. *Food Engineering Reviews*, 6(3), 43–55.

Movagharnejad, K etNikzasd, M. 2007.Modelling of tomato drying using artificial neural network comput.*Electron. Agric.* 59(1-2), 78-85.

Mujumdar A. S. (2006). Handbook Of Industrial Drying, 3rd Edition. Taylor and Francis Group, LLC, 688-700.

N'goran, Sadat, Assidjo et Kouame.(2012). Etude de l'influence des paramètres de la déshydratation osmotique sur la perte en eau des fruits tropicaux: essais avec la papaye (*Caricapapaya*) et la mangue (*Mangiferaindica*).*Journal of Applied Biosciences* 59: 4330–4339.

NdjouenkeuR. (2003).Opportunité d'amélioration de la qualité de la poudre de tomate par couplage entre la déshydratation osmotique et le séchage thermique, Savanes africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis. Actes du colloque, Garoua Cameroun. Prasac, N"Djamena, Tchad - Cirad, Montpellier, France, 3p.

Nieto A.B, Salvatori D.M, Castro M.A et Alzamora S.M. (2004). Structural changes inapple tissue during glucose and sucrose osmotic dehydration: Shrinkage, porosity, density andmicroscopic features. *Journal of Food Engineering*, 61, 269–278.

Nout R, Hounhouigan J.D et Van Boekel. (2003). Les aliments (transformation, conservation, qualité), p4 et 268.

Nsonzi F et Rarnaswarny H.S. (1998). Osmotic dehydration kinetics of blueberries. *Drying Technology*, **16**, 725-741. Objectifs et critères de sélection. Ed. INRA. Paris.

Obajemih O. I., Sunmonu M. O., Odewole M. M., Adeboye O. A et Omoleyomi B. D. (2018). Empirical modelling and optimization of drying rate and quality attributes of tomato (*Lycopersicon esculentum*) using response surface methodology (RSM). *FUOYE Journal of Pure and Applied Sciences*. 2(1). 260-274.

Obajemih O. I., Olaoye, J. O., Ojediran, J. O., Cheng, J., & Sun, D. (2020). Model Development and Optimization of Process Conditions for Colour Properties of Tomato in a Hot-Air Convective Dryer using Box-Behnken Design. *Journal of Food Processing and Preservation*.

Outis A et Y. Yahiya. (2016). Effet du séchage au micro-onde et à l'étuve sur la composition et l'activité anti-oxydante de la tomate *Solanum lycopersicum L.* Science alimentaire. Bejaia, Abderahman Mira. master.

Panades G, Castro D, Chiralt A, Fito P, Nunez M et Jimenez R. (2008). Mass transfer mechanisms occurring in osmotic dehydration of guava. *Journal of Food Engineering*, **87**, 386-390.

Penchev P-I. (2010). Étude des procédés d'extraction et de purification de produits bioactifs à partir de plantes par couplage de techniques séparatives à basses et hautes pressions. Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, France. 218 p

Perkin R. M. (1980). The heat and mass transfer characteristics of boiling point drying Using radio frequency and microwave electromagnetic fields. *International Journal of Heat And Mass Transfer*, **23**(5), 687-695.

Péron J Y. (2006). Références Production Légumière 2ème édition. Paris, Lavoisier. 613.

Philouze J et Hedde I. (1995). The tomato . *Scientific American*, **59**, 85-146p.

Polese K.M. (2007). La culture de tomate. Ed. Artémis: 95p.

- Ponting J.D, Watters G.G, Forrey R.R, Jackson R et Stanley W.L.** (1966). Osmotic
- Raoult-Wack A.L.** (1994). Advances in Osmotic Dehydration, Trends in Food Science and Technology, Vol. 5, N°8. 255 - 260.
- Rastogi N.K et Raghavarao K.S.M.S.** (2004). Mass transfer during osmotic dehydration of foods. *Food Sci. Technol.*, n.5.255-260.
- Rastogi N.K, Raghavarao K.S.M.S, Niranjana K et Knorr D.** (2002). Recent developments in osmotic dehydration methods to enhance mass transfer, Trends Food Science Technology, 13 (2), 58–69.
- Riva M.** (2005). Structure property relationships in osmo-air-dehydrated apricot cubes. *Food Res. Int.*, 38, 533-542.
- Sahu J. K et Tiwari A.** (2007). Moisture sorption isotherms of osmotically dehydrated sweet pepper. *International Journal of Food Engineering* 3 (5): article 15.
- Salunkhe D. K, Bolin H. R et Reddy N. R.** (1974). Storage, processing, and nutritional quality of fruits and vegetables. Cleveland: CRC Press.
- Santarius K.A.** (1982). Effects of high-temperature stress on various bio-membranes of leaf cells in situ and in vitro. *Plant Physiology*, 70, 200-205.
- Schnell D.** (1983). Technique de séchage. Traduit de l'allemand, GMBH, Eschborn.
- Schuck P, Dolivet A et Jeantet R.** (2012). Les poudres laitières et alimentaires : Techniques d'analyse. Lavoisier. p.8 et 21.
- Shankara N, Van lidt de jeud J, de Goffau M, Hilmi M, Van Dam B et Florijin A.** (2005). La culture de la tomate : production, transformation et commercialisation. 5eme (ed). foundation agromisa et CTA, Wageningen.
- Shix Q, Chiralt A, Fito P, Serra J et Gasque C.** (1996). Application of Osmotic Dehydration Technology on Jam Processing. *L Drying Technology* .841-847.
- Singh C, Sharma H et Sarkar B.** (2008). Optimization of process conditions during dehydration of fresh pineapple. *J. Food Sci. Technol.-Mysore*, 45, 312-316.

Snoussi S. A. (2010). Rapport de mission : Eude de base sur la tomate en Algérie. Ministère de l'Agriculture et du développement rural, Direction des statistiques. (MRAD).

Talens P, Escriche I, Martinez-Navarrete N et Chiralt A. (2003). Influence of osmotic dehydration and freezing on the volatile profile of kiwi fruit. *Food research international*, 36, 635-642.

Taoussaint A et Baudoin J-P. (2010). Biodiversité chez la tomate, stratégie de conservation et valorisation de la collection <<Luc Fichot*>> Gembloux agro bio tech. 102 p.

Torrengiani D. (1993). Osmotic Dehydration in Fruits and Vegetable Processing, *Food Research International*, Vol. 26, N°1, pp. 59 - 68,

Touati B. (2001). Modélisation numérique des transferts couplés de chaleur et de masse lors du séchage des feuilles de menthe, Mémoire de Magistère, Centre Universitaire de Bechar, Algérie.

Vasseur J.(2009).séchage : principe et calcul d'appareils. Séchage convectif par air chaude partie I, J2451. P.25.

Verolet J-F, Raffin R, Jagu L et Berry D. (2001). Tomate sous grand tunnel froid, *Fichetechnique*, 9p.

Vial C, Guilbert S et Cuq J. (1990). Osmotic dehydration of kiwi-fruits.influence of process variables on the colour and ascorbic acid content. *Sci. Aliments*, n. 11.63-84.

W. L McCabe, J. C Smith et P. Harriott, "Unit operation of chemical engineering ", Hill Book Company (1985).

Wang W.C. etSastry S.K. (2000). Effects of thermal and electrothermal pretreatments on hot air drying rate of vegetable tissue. *Journal of Food Process Engineering*, 23, 299-319.

Witek-Krowiak, A., Chojnacka, K., Podstawczyk, D., Dawiec, A., Pokomeda, K., 2014.

Wu L, Orikasa T, Tokuyasu K, Shina T et Tagawa A. (2009). Applicability of vacuum-dehydrofreezing technique for the long-term preservation of fresh-cut eggplant: effects of process conditions on the quality attributes of the samples. *Journal of Food Process Engineering*, 91, 560-565.

Z.E.B., Aw S, Assidjo E.N et 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 (*Caricapapaya*) et la mangue (*Mangifera indica*). *Journal of Applied Biosciences* 59, 4330-4339.

Annexe

Tableau 1 : Application de la déshydratation osmotique sur des fruits et légumes.

Fruit et Légume	Conclusions majeures	Références
Goyave	La DO sous vide à une température de 40 et 50 °C offre le meilleur coefficient de diffusion d'eau	Panades et <i>al.</i> , 2008
Citrouille	La DO entraîne une modification de la structure cellulaire (45 °Brix, 25 °C, 20:1,9h)	Mayor et <i>al.</i> , 2008
Concombre	Le traitement par DO avant congélation améliore la fermeté du fruit et prolonge sa période de conservation par rapport à la DO seule	Dermesonl ouoglou et <i>al.</i> , 2008
Haricot	La perte d'eau maximale a été obtenue quand des tranches de fruit de 10 mm ont été immergées dans une solution de concentration en sucrose de 60° Brix, maintenue à 60 °C pour 2 h, alors que l'imprégnation maximum était obtenue quand les tranches de 5 mm ont été immergées dans une solution de 50 °Brix, maintenue à 60 °C durant 6 h	Abud-Archila. 2008
Melon	L'utilisation d'une solution de maltose (40-60 °Brix) entraîne une augmentation de la perte en eau et une diminution du gain en soluté, contrairement au saccharose	Ferrari et <i>al.</i> , 2008
Papaye et mangue	Différence de concentration entre la solution et le matériau à traiter est le moteur de la perte en eau indépendamment du fruit traité	N'GORN et <i>al.</i> , 2012
Oranges	Le procédé de déshydratation osmotique a été optimisé pour la perte d'eau, la réduction de poids et le gain en soluté. Les conditions optimales de la déshydratation osmotique des oranges (confisage) sont obtenues à: une température de 50 °C, une concentration de 65 % et une durée de 240 mn	Khatir., 2013
Frais	La Méthodologie des Surfaces de Réponse, suivant le Composite Central Design(CCD), a été utilisée pour optimiser les paramètres influençant la déshydratation osmotique des tranches de fraises dans une solution de saccharose en vue d'obtenir une perte en eau maximale et un gain en solide minimal	Ferradj et <i>al.</i> , 2016
Carottes	La méthodologie des surfaces de réponse a été utilisée pour la détermination des conditions optimales permettant le maximum de perte en eau et de réduction du poids et un minimum de gain en solide au cours de la déshydratation osmotique des carottes dans une solution concentrée de saccharose	Ferradj et <i>al.</i> , 2017
Grenade	L'utilisation d'une température de 40°C, une concentration de saccharose de 50°Brix et un rapport solution/produit de 1:4 offrent une meilleure déshydratation	Khoualdia et <i>al.</i> , 2020