

Impact du couplage de la déshydratation osmotique et du séchage sur la qualité nutritionnelle de la tomate séchée

Impact of the coupling of osmotic dehydration and drying on the nutritional quality of dried tomato

Malakasa Mandefu A.G.¹, Mbangu Ndongala C.¹, N'dendje Batiango J.¹, Kizungu Vumilia R.^{2,3} & Sumbu Zola E.²

¹ Département de Biochimie et Technologie des Aliments/CGEA/CREN-K, RDC

² Département de Chimie et Industries Agricoles/Faculté des Sciences Agronomiques/Université de Kinshasa, RDC

³ Institut National d'Etudes et de Recherches Agronomiques (INERA), RDC

Article info

Histoire :

Reçu le 08/06/2022

Accepté le 25/06/2022

Keywords: Couplage,
Déshydratation osmotique,
Séchage, Qualité.

*Auteur Correspondant

aimeguyfr@gmail.com

Résumé

Le présent travail vise à évaluer l'effet des paramètres opératoires sur la teneur en cendre, la perte en caroténoïdes totaux et la perte en vitamine C de la tomate au cours des procédés de déshydratation et à modéliser ce phénomène en vue d'en déduire les conditions opératoires optimales.

Des modèles prédictifs ont été proposés pour relier les attributs de qualité du produit fini aux différentes variables opératoires de la déshydratation osmotique combinée au séchage.

La condition optimale de travail de la combinaison déshydratation osmotique/séchage appliquée aux tomates est donc l'utilisation d'une concentration de chlorure de sodium de 100 g/l, une température de la solution osmotique de 30°C, une durée de la déshydratation osmotique de 60 minutes et une température de séchage de 60 °C pour obtenir un produit final avec une perte en acide ascorbique la plus basse de 2,29%, une teneur minimale en perte en caroténoïdes totaux de 15,17% et une teneur minimale en cendres de 0,84%.

Article info

Article history:

Received 08/06/2022

Accepted 25/06/2022

Keywords: Coupling, Osmotic
dehydration, drying, quality.



Copyright©2022 JOASD

* Corresponding author

aimeguyfr@gmail.com

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Abstract

The present work aim to evaluate the effect of the operating parameters on the ash content, the loss of total carotenoids and the loss of vitamin C of the tomato during drying processes and to model this phenomenon in order to deduce the optimal operating conditions. Predictive models have been proposed to relate quality attributes of the finished product to different operating variables of osmotic dehydration combined with drying.

The optimal working condition of the osmotic dehydration / drying combination applied to tomatoes is therefore the use of a sodium chloride concentration of 100 g/l, a temperature of the osmotic solution of 30 °C, a duration of the osmotic dehydration 60 minutes and a drying temperature of 60 °C to obtain a final product with the lowest ascorbic acid loss of 2.29%, a minimum total carotenoid loss content of 15.17% and a minimum content of 0.84% ash.

1. INTRODUCTION

La tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) est l'une des cultures maraîchères les plus importantes (DPP/MAEP, 2008). Sa culture s'impose comme une importante activité génératrice de revenus pour les paysans aussi

bien des milieux ruraux que dans les milieux périurbains (DAPS/MDR, 1994).

La tomate est quotidiennement utilisée dans les ménages sous différentes formes (légume, fruit, pâte, poudre,...) pour ses qualités organoleptiques et sa richesse en vitamines spécialement, la vitamine C. En plus, la tomate

est une source importante de caroténoïdes, dont le lycopène (Perveen, 2013). La tomate contient d'autres substances, telles que la néoxanthine, la lutéine, le cryptoxanthine, l' α -carotène, le β -carotène, le cyclolycopène et le β -carotène 5,6-époxyde (Perveen, 2013). Les caroténoïdes sont des pigments de synthèse qui interviennent pendant la maturation du fruit et qui sont responsables de la couleur finale rouge de la tomate (Perveen, 2013) et jouent un rôle dans la saveur de la tomate. En effet, ce sont des précurseurs de composés aromatiques volatiles (Vogel, 2010). La saveur de la tomate est dépendante de son contenu en sucres, de son titre acide et du ratio sucre/acide (Zhang, 2014). La tomate crue est aussi une source des minéraux et oligo-éléments (Calcium, cuivre, fer, iode, magnésium, phosphore, potassium, sélénium, sodium, zinc) (Raffo *et al.*, 2012). Cependant, la dégradation de la tomate fraîche est accentuée par sa teneur en eau très élevée (environ 90%) qui favorise sa détérioration physico-chimique et microbiologique (Igwe *et al.*, 1999). La stabilisation de la tomate en vue de la réduction des pertes post-récoltes et de sa disponibilité durant toute l'année devient un enjeu important pour le développement de la filière. Diverses stratégies de réduction des pertes ont été développées et le séchage constitue le principal moyen de conservation des produits agricoles.

Au cours du séchage de la tomate, on observe en effet une réduction du taux de vitamine C, une augmentation du taux d'hydroxy-méthylfurfural, intermédiaire de la réaction de brunissement non enzymatique et une isomérisation du lycopène (Dandjouma *et al.*, 2005). La déshydratation osmotique paraît une solution à ce problème. En effet, la déshydratation osmotique permet le maintien voire l'amélioration des qualités nutritionnelles et organoleptiques de produits souvent fragiles, ainsi qu'une meilleure résistance à des traitements ultérieurs (séchage, stockage, ...). Elle augmente également le rapport sel/acide, améliore la texture et préserve la couleur pendant la déshydratation et le stockage (Raoult-Wack, 1994). En évitant le contact avec l'oxygène de l'air, elle limite les réactions d'oxydation, et aussi les pertes de composés volatils par entraînement (Ponting, 1973). L'effet bénéfique et protecteur du soluté renforce également la qualité d'un produit obtenu par rapport au séchage seul.

La présente étude a pour objectif général la contribution à la recherche des voies de conservation et de valorisation de la tomate fraîche produite localement et vise spécifiquement l'évaluation de l'impact du couplage de la déshydratation osmotique et du séchage sur la qualité de la tomate séchée à travers l'évaluation de sa teneur en vitamine C, en pigments totaux (caroténoïdes) et en minéraux totaux (cendres) et de modéliser ces phénomènes en vue d'avoir les outils nécessaires pour estimer la qualité physicochimique de la tomate séchée.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. Matériel

Des tomates mûres de la variété caraïbe, récoltées au Centre de Production des Semences (CEPROSEM) à Kimbondo (Mnt-Ngafula) ont été utilisées dans cette étude comme matériel végétal.

Le chlorure de sodium acheté au marché de rond point Ngaba à Kinshasa (RDC) a été utilisé comme agent osmotique et dont la pureté testée à 95%.

2.2. Méthodes

2.2.1. Analyse des paramètres morphologiques et teneur en eau de la tomate fraîche

Les poids des échantillons ont été déterminés par pesée à l'aide d'une balance analytique de marque METTLER TOLEDO (AB 54-S/FACT). La hauteur et le diamètre des échantillons ont été déterminés à l'aide d'un pied à coulisse digital. Le coefficient de forme a été déterminé en effectuant le rapport entre le diamètre moyen et la hauteur moyenne des fruits. Ces caractéristiques morphologiques ont été déterminées sur une quarantaine de fruits en bon état. La teneur en eau de la tomate a été déterminée par étuvage à 105°C jusqu'à poids constant.

2.2.2. Préparation des solutions osmotiques

Différentes concentrations de la solution osmotique ont été préparées selon le plan d'expérience utilisé. La solution est préparée en mélangeant la masse du sel pesée avec de l'eau distillée jusqu'à sa dissolution complète dans un ballon jaugé de capacité connue. Après obtention d'un mélange homogène, la solution concentrée

est prête pour son utilisation (Malakasa *et al.*, 2019).

2.2.3. Conduite du couplage déshydratation osmotique – séchage de la tomate

La déshydratation osmotique des échantillons de tomate a été effectuée dans des bocaux en verre d'une capacité de 500 millilitres. Chaque bocal contenant un échantillon de tomate et 300 ml de la solution osmotique concernée, était fermé à l'aide de son couvercle puis maintenu au bain-marie thermostaté sous une douce agitation, aux températures et à des durées de traitement tels que montrés dans le Tableau de plage de variation des variables indépendantes présenté dans le Tableau 2.

Un plan d'expériences composite centré à quatre facteurs indépendants (concentration en chlorure de sodium de la solution osmotique : 100 – 300 g/l, température de déshydratation osmotique : 30 – 60°C, durée de la déshydratation osmotique : 1 – 8 h, température du séchage : 40 – 60°C) et cinq niveaux a été établi à l'aide du logiciel Minitab 17 (MINITAB, Inc., State College, PA).

La matrice codée du plan expérimental et la plage de variation des variables indépendantes sont présentées dans les Tableaux 1 et 2.

Afin d'accroître la précision des résultats obtenus, ce plan expérimental a été répété une fois en vue de rendre plus fiables les données générées et de permettre le traçage des surfaces de réponse.

L'analyse de la variance a été réalisée suivant le modèle :

$$R = R_0 + aA + bB + cC + dD$$

A, B, C et D représentent les variables indépendantes appliquées, R étant la réponse étudiée, R_0 la réponse moyenne, a, b, c et d étant des constantes d'ajustement du modèle. Ce modèle a permis d'apprécier les contributions linéaires ainsi que les effets des variables indépendantes sur les réponses étudiées.

Les surfaces de réponses, l'ajustement des modèles de variation et la recherche des optima ont été réalisés à l'aide du logiciel Minitab 17

(MINITAB, Inc., State College, PA).

Tableau 1. Matrice codée du plan expérimental

Traitement	A	B	C	D
1	1	-1	1	1
2	0	2	0	0
3	0	0	-2	0
4	-1	1	-1	-1
5	1	-1	-1	1
6	1	1	1	1
7	-2	0	0	0
8	-1	-1	1	-1
9	0	0	0	0
10	1	1	1	-1
11	0	0	0	0
12	1	-1	1	-1
13	1	1	-1	-1
14	0	0	0	0
15	-1	1	-1	1
16	0	0	0	0
17	-1	1	1	-1
18	0	0	0	0
19	0	-2	0	0
20	-1	1	1	1
21	2	0	0	0
22	0	0	0	0
23	1	1	-1	1
24	-1	-1	-1	-1
25	0	0	0	2
26	1	-1	-1	-1
27	0	0	0	-2
28	-1	-1	1	1
29	0	0	2	0
30	-1	-1	-1	1
31	0	0	0	0

A, B, C et D variables indépendantes telles que signifiées dans le Tableau 2.

2.2.4. Détermination des paramètres nutritionnels

✓ Détermination de la teneur en cendres :

Elle a été déterminée par calcination dans un four à moufle à 550°C pendant 4 heures selon les procédures du laboratoire de Biochimie et Technologie des Aliments du Centre Régional d'Etudes Nucléaires de Kinshasa (LBTA, 2005). Et le résultat a été calculé à l'aide de l'expression suivante :

$$\% \text{ cendre} = (P_1/P_2) \times 100$$

avec P_1 le poids de la prise d'essai et P_2 poids de la cendre.

Tableau 2. Plage de variation des variables indépendantes.

Variables indépendantes		-2	-1	0	+1	+2
Concentration de la solution osmotique	A (g/l)	100	150	200	250	300
Température de la DO	B (°C)	30	37,5	45	52,5	60
Durée de la DO	C (h)	1h	2 h45	4 h30	6 h30	8h
Température du séchage	D (°C)	40	45	50	55	60

✓ Détermination de la teneur en caroténoïdes totaux

La perte en caroténoïdes totaux de la tomate séchée a été évaluée par la différence de concentration entre les tomates séchées et les tomates fraîches.

Les caroténoïdes totaux ont été extraits par la méthode de Lin and Chen (2003) telle que décrite par Belaidi Syrine et Dokari Amina (2018) et dosés à l'aide du spectrophotomètre uv-visible de marque 6705 UV/Vis spectrophotometer Jenway (Single cell holder).

✓ Extraction des caroténoïdes totaux

Un volume de 32 ml du mélange éthanol/Hexane (4/3, v/v) sont ajoutés à 8 g de poudre de tomate versés dans une ampoule à décanter. Après agitation pendant 30 minutes puis un repos de quelques minutes, le mélange solvant d'extraction et pigments de la poudre de tomate est fait passer, à travers le robinet de l'ampoule à décanter, vers une deuxième ampoule à décanter propre et sèche. Ensuite 14 ml d'hexane sont ajoutés à la première ampoule à décanter et une deuxième extraction est réalisée. L'extraction est arrêtée lorsque le solvant devient clair. On mélange toutes les extractions de la première ampoule dans la deuxième ampoule puis 100 ml de NaCl 10% et 150 ml de l'eau distillée sont ajoutés et on fait la séparation à l'aide d'une ampoule à décanter. Le solvant contenant les pigments de la tomate est récolté dans un récipient propre et sec.

✓ Dosage des caroténoïdes totaux

Après l'extraction, une incubation pendant 17 h à l'abri de la lumière de l'extrait recueilli a été réalisé. Après cette incubation, un volume de 5 ml d'hexane a été ajouté, après 1 minute. 5 ml de sulfate de sodium à 1% (m/v) ont été ajoutés puis laisser décanter à l'abri de la lumière pendant 1 h et une absorbance a été mesurée à une longueur d'onde de 450 nm. Le calcul des concentrations a été fait en se référant à une courbe d'étalonnage réalisée dans les mêmes conditions. Le pourcentage des pertes des caroténoïdes totaux de la tomate a été calculé d'après la formule ci-après :

$$\% \text{ perte caroténoïdes totaux} =$$

$$\frac{(\% \text{ caroténoïdes tomate fraîche} - \% \text{ caroténoïdes tomate traitée})}{(\% \text{ caroténoïdes tomate fraîche})} \times 100$$

✓ Détermination de la teneur en vitamine C

La perte en vitamine C de la tomate séchée a été évaluée par la différence de concentration entre les tomates séchées et les tomates fraîches. La vitamine C dans les échantillons de tomate a été dosée par la méthode iodométrique telle que décrite par Melle Sari Mohammed Fadia Wafaa (2017) qui a consisté à doser l'excès de diiode présent dans le milieu par une solution de thiosulfate de sodium. La détermination de la quantité d'acide ascorbique contenue dans un échantillon de tomate s'est faite grâce à un dosage indirect où on oxyde l'acide ascorbique en acide déhydro-ascorbique par le diiode. A la suite de cette première réaction, on dose l'excès de diiode, n'ayant pas réagi, avec le thiosulfate de sodium. Par différence, on détermine alors la quantité de matière en acide ascorbique de la solution initiale. Le diiode en excès est repéré en ajoutant quelques gouttes d'empois d'amidon qui jouent le rôle d'un indicateur coloré.

Ainsi, le pourcentage en perte de la vitamine C dans la tomate a été calculé selon la formule suivante :

$$\% \text{ perte vitamine C} =$$

$$\frac{(\% \text{ vitamine C tomate fraîche} - \% \text{ vitamine C tomate traitée})}{(\% \text{ vitamine C tomate fraîche})} \times 100$$

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Paramètres morphologiques et teneur en eau de la tomate

Les valeurs obtenues renseignent que les fruits utilisés, en plus d'être de la même variété et cultivés dans les mêmes conditions, leurs tailles et formes ont été similaires (Tableau 3).

Tableau 3. Paramètres morphologiques et teneur en eau de la tomate

Paramètres déterminés	Unité	Valeur trouvée
Poids moyen	Gramme	38,89 ± 3,0
Diamètre moyen	Millimètre	51,72 ± 2,1
Hauteur moyen	Millimètre	42,06 ± 2,6
Coefficient de forme (Cf)	-	0,81 ± 0,07
Nombre de lobes	-	4 ± 0,00
Teneur moyenne en eau	%	95,78 ± 0,75

Cf < 0,8 : forme aplatie ; entre 0,8 et 1 : forme ronde ; Cf > 1 : forme allongée (Fagbohoun et Kiki, 1999)

Au regard de la valeur du coefficient de forme (0,81±0,07) et d'après la classification de Fagbohoun O, Kiki D. (1999), les fruits utilisés peuvent être considérés comme ronds et par

conséquent suffisamment proches de la géométrie sphérique.

La tomate de la variété caraïbe utilisée dans ce travail contient une teneur en eau très élevée, aux environs de 95,78 %, ce qui fait qu'elle soit très périssable comme le sont aussi bien d'autres variétés.

3.2. Résultats du couplage de la déshydratation osmotique et du séchage de la tomate

3.2.1. Effet des paramètres opératoires sur la teneur en cendre de la tomate

Le Tableau 4 donne l'analyse de la variance des paramètres du procédé pour la teneur en cendre. L'analyse de la variance synthétisée dans le Tableau 4 montre que le modèle expérimental mis en œuvre influence de façon hautement significative la teneur en cendre de la tomate séchée (p-Value = 0 du modèle général). Les résultats présentés dans ce Tableau montrent

solution du traitement de la tomate. Il en est de même de la variable durée du traitement osmotique. Ceci implique qu'une augmentation de ces 2 variables induit l'augmentation de la teneur en cendre dans la tomate séchée.

La déshydratation osmotique en milieu salé induit une augmentation de la teneur en cendre à différentes concentrations. Cette augmentation de la charge minérale de la tomate séchée serait attribuable à l'absorption du chlorure de sodium contenu dans la solution d'imprégnation de la tomate. La teneur en cendre augmente avec l'augmentation de la concentration de la solution osmotique.

Cette observation a été aussi constatée par Robert Ndjouenken (2007) dans son travail sur l'opportunité d'amélioration de la qualité de la tomate par couplage entre déshydratation osmotique et le séchage selon lequel le prétraitement par déshydratation imprégnation en solution salée apporte un surcroît de

Tableau 4. Analyse de la variance des paramètres du procédé pour la teneur en cendre

Source de variation	DL	SC	CM	F-value	P-value
Modèle de la régression	4	186,9	46,7	65,0	0,000
Concentration de la solution osmotique	1	170,7	170	237	0,00
T° de la déshydratation osmotique	1	0,351	0,35	0,49	0,49
Durée de la déshydratation osmotique	1	15,79	15,8	21,9	0,000
Température du séchage	1	0,028	0,03	0,04	0,84
Erreur	26	18,68	0,718		
Ajustement	21	18,56	0,88	38,4	0,000
Erreur pure	5	0,115	0,02		
Total	30	205,6			

DL : Degré de Liberté ; SC : Somme de carré des écarts ; CM : Carré moyen des écarts.

que la concentration de la solution osmotique et la durée de la déshydratation osmotique sont des variables qui ont influencé de manière significative la teneur en cendre de la tomate séchée au cours du procédé de couplage (Leurs p-value étant égales à zéro). Par contre les gammes de température de la déshydratation osmotique et de la température du séchage utilisées n'ont pas induit des changements statistiquement significatifs.

La Fig. 1 donne l'effet de la concentration de la solution osmotique et de la durée du traitement osmotique sur la teneur en cendre de la tomate séchée

La Fig. 1 compare les changements induits par la variation de la concentration de la solution osmotique et de la durée de la déshydratation osmotique sur la teneur en cendre de la tomate séchée au cours du processus de couplage. On y observe une variation continue de la teneur en cendre en fonction de la concentration de la

minéraux provenant de l'absorption du sel par la tomate.

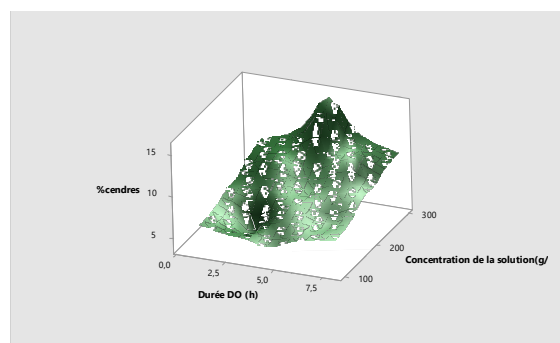


Fig. 1. Surface de réponse de la teneur en cendre de la tomate séchée en fonction des variables concentration et température.

D'après Michelline Agossounon et al. (2012), cette situation s'expliquerait par le fait qu'au cours du séjour dans la saumure, les tomates, par le phénomène d'osmose aient absorbées une grande quantité de sel. La concentration

intracellulaire en NaCl devenant ainsi de plus en plus élevée.

D'après Nadia Djendoubi (2012), l'augmentation de la concentration de la solution osmotique entraîne une augmentation des gradients de pression osmotique et, par conséquent, les gains en soluté plus élevés tout au long de la déshydratation osmotique. Des résultats similaires ont été rapportés par Azoubel et Murr (2004).

Indépendamment de la concentration, la cinétique de transfert de matière se décompose en deux phases. Une première phase rapide d'une durée systématiquement variant de 30 à 60 minutes, durant laquelle l'essentiel des transferts de solutés s'opèrent. Elle dépend essentiellement de la concentration de la solution osmotique. Elle est suivie d'une seconde phase marquée par la forte diminution de l'intensité des échanges. La présence de ces deux phases a été largement rapportée pour les cinétiques de transferts de matière des produits alimentaires traités par Déshydratation Imprégnation par Immersion (DII) (Guenneugues, 1986 ; Singh et al., 2007).

La Fig. 2 montre les effets principaux des paramètres opératoires sur la teneur en cendre de la tomate séchée

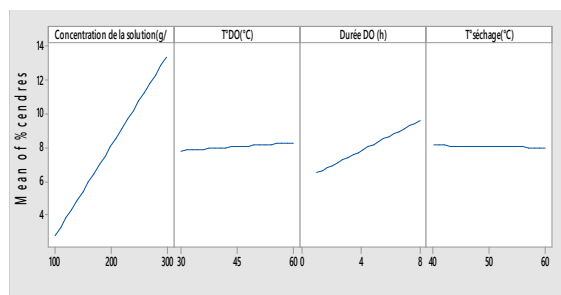


Fig. 2. Effets principaux des paramètres opératoires sur la teneur en cendre de la tomate séchée

La Fig. 2 montre les effets principaux des paramètres opératoires sur la teneur en cendre de la tomate au cours du procédé de couplage.

L'analyse des résultats de cette Fig. montre que la concentration de la solution osmotique et la durée du traitement osmotique ont une influence sur la teneur en cendre de la tomate séchée. La concentration de la solution osmotique s'est révélée statistiquement plus

influyente que la durée du traitement osmotique. L'augmentation de ces 2 variables a entraîné l'augmentation de la teneur en cendre de la tomate séchée.

Par contre les variables température de la déshydratation osmotique et température du séchage se sont montrés non significatives. Leurs modifications n'ont entraîné aucun changement de teneur en cendre de la tomate séchée.

L'équation de la régression de teneur en cendre de la tomate séchée peut s'écrire comme suite :

$$\begin{aligned} \% \text{ cendre} = & -5,01 + 0,05335 \text{ Concentration de la solution} \\ & \text{osmotique (g/l)} + 0,0161 T^{\circ} \text{ de la déshydratation} \\ & \text{osmotique (}^{\circ}\text{C)} + 0,4418 \text{ Durée de la} \\ & \text{déshydratation osmotique (h)} - 0,0069 T^{\circ} \text{ de} \\ & \text{séchage (}^{\circ}\text{C)} \end{aligned}$$

L'équation de la régression de la teneur en cendre de la tomate séchée montre que l'effet moyen est de 5,01% sur la teneur en cendre et l'effet principal de la concentration de la solution osmotique (0,05%) est supérieur à celui de la température de la déshydratation (0,01%) et celui de la température du séchage (0,0069%) mais inférieur à celui de la durée de la déshydratation osmotique (0,44%).

L'effet de la durée de la déshydratation osmotique se révèle essentiel et supérieur à celui de la concentration de la solution osmotique. Le modèle mis au point montre une contribution plus importante de la durée de traitement comparativement à la contribution de l'effet de variation des autres variables d'étude. Il est en effet connu que le phénomène de déshydratation est un phénomène convergent dans le temps vers une valeur asymptotique. Une telle convergence suppose une allure curviligne de la réponse en fonction du temps. Cette observation a été constatée aussi par Tabala (2016) dans son travail sur l'évaluation et modélisation des effets des paramètres de la déshydratation osmotique de la tomate.

3.2.2. Effet des paramètres opératoires sur la perte en caroténoïdes totaux de la tomate

Le Tableau 5 donne l'analyse de la variance des paramètres du procédé pour la perte en caroténoïdes de la tomate séchée

L'analyse statistique (ANOVA) des résultats du Tableau 5 a montré que, dans la gamme des conditions opératoires étudiée, les pertes en caroténoïdes totaux ont été significativement affectées ($p < 0,05$) par la concentration en sel de la solution osmotique et la température de séchage. Le modèle expérimental mis en œuvre influence de façon significative la perte en

changements les plus importants. Dans cette Fig., on observe une variation de la perte en caroténoïdes totaux avec la variation de ces 2 variables. Il ressort de cette Fig. que la concentration en soluté et la température de la déshydratation osmotique affectent la perte en caroténoïdes totaux de la tomate déshydratée. L'influence de la concentration en sel et de la

Tableau 5. Analyse de la variance des paramètres du procédé pour la perte en caroténoïdes

Source de variation	DL	SC	CM	F-value	P-value
Modèle de la régression	4	1370,15	342,5	3,39	0,023
Concentration de la solution osmotique	1	510,70	510,7	5,05	0,033
T° de la déshydratation osmotique	1	5,64	5,64	0,06	0,491
Durée de la déshydratation osmotique	1	139,10	139,1	1,38	0,815
Température du séchage	1	714,71	714,7	7,07	0,013
Erreur	26	2627,56	101,060		
Ajustement	21	2484,04	118,3	4,12	0,061
Erreur pure	5	143,51	28,702		
Total	30	3997,70			

DL : Degré de Liberté ; SC : Somme de carré des écarts ; CM : Carré moyen des écarts.

caroténoïdes totaux de la tomate séchée (p -Value = 0,023 du modèle général). Les résultats présentés dans ce Tableau montrent donc que la concentration de la solution osmotique et la température du séchage sont des variables qui ont influencé de manière significative la perte en caroténoïdes totaux de la tomate séchée au cours du procédé de couplage (Leurs p -Value étant égales à 0,033 et 0,013). Par contre les gammes de température de la déshydratation osmotique et la durée du traitement osmotique n'ont pas induit des changements statistiquement significatifs.

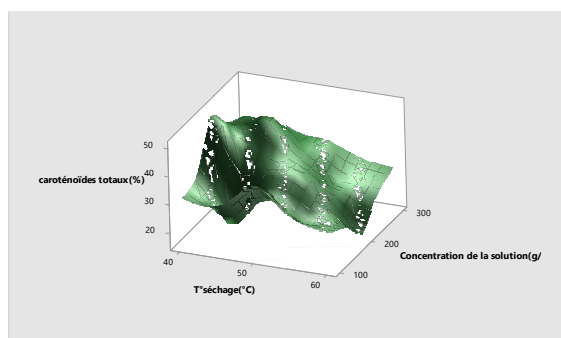


Fig. 3. Surface de réponse de la perte en caroténoïdes totaux de la tomate séchée en fonction des variables concentration de la solution osmotique et température du séchage.

La Fig. 3 donne la surface de réponse de la perte en caroténoïdes totaux de la tomate séchée en fonction de la concentration de la solution osmotique et de la température du séchage. Au cours de la déshydratation des fruits et légumes, la perte de couleur est l'un des problèmes de

température du séchage en termes de perte en caroténoïdes totaux a été évaluée en utilisant une analyse de la variance. Les résultats de l'analyse de la variance confirment que la concentration et la température du séchage ont un effet significatif ($p < 0,05$) sur la perte en caroténoïdes totaux lors du couplage de la déshydratation osmotique et du séchage de la tomate.

L'influence de la concentration en sel et de la température du séchage en termes de perte en caroténoïdes totaux a été évaluée en utilisant une analyse de la variance. Les résultats de l'analyse de la variance (Tableau 5) confirment que la concentration et la température du séchage ont un effet significatif ($p < 0,05$) sur la perte en caroténoïdes totaux lors du couplage de la déshydratation osmotique et du séchage de la tomate. Cependant, l'augmentation de la concentration de la solution osmotique a entraîné une diminution significative de la perte en vitamine C à la concentration de 150 g/l. Le traitement osmotique améliore la couleur du produit lors du séchage. Des observations similaires ont été rapportées par Prothon *et al.* (2001) dans l'étude de la déshydratation de la pomme, Vega-Galvez *et al.* (2008) chez le poivron rouge et Femenia *et al.* (2003) chez l'Aloe Vera.

La couleur de la tomate séchée est affectée par la température suite à une longue durée d'exposition au séchage. La dégradation de la couleur augmente en fonction du temps et est dépendante de la température de séchage. Il a

été constaté que plus la durée d'exposition de la tomate est longue au séchage plus la tomate est susceptible de subir des grandes pertes en pigments. La température a donc un effet sur la durée de séchage. Plus la température est basse plus la durée d'exposition de la tomate est longue, plus la perte en pigments (caroténoïdes) est élevée. La dégradation des pigments de la tomate est provoquée par les réactions de brunissements non enzymatiques favorisées par la température de séchage. Les changements de la couleur liés à la température s'expliqueraient par la présence dans la tomate de composants qui participent à la réaction de Maillard en formant des composés précurseurs des composants colorés, tels que les protéines, et les sucres réducteurs, mais également la vitamine C et les ortho-phénols naturels. Ces réactions sont favorisées par l'exposition prolongée du produit lors du séchage. Les modifications des paramètres responsables de la couleur se produisent pour des activités de l'eau comprises entre 0,3 et 0,7 ; ce qui a été reporté comme étant l'intervalle d'activité de l'eau favorable au brunissement de nombreux produits (Maltini et al., 2003). Un résultat similaire a été rapporté par Islam et al. (1982), Jayaraman et al. (1990) et Azoubel et Murr (2004), lors de la déshydratation de la pomme de terre, de chou-fleur et de la tomate cerise respectivement. Moumenir et al. (2016) dans leur travail sur la valorisation de la tomate pour l'obtention d'une poudre riche en constituants antioxydants ont constaté que plus la température est élevée plus la perte en eau est importante et le temps de séchage se trouve plus réduit

La Fig. 4 donne les effets principaux des paramètres opératoires sur la perte en caroténoïdes totaux la tomate séchée. La Fig. 4 montre les effets principaux des paramètres opératoires sur la perte en caroténoïdes totaux de la tomate séchée. L'analyse des résultats de cette Fig. montre que la concentration de la

solution osmotique et la température du séchage influencent la perte en caroténoïdes totaux. La température du séchage s'est révélée statistiquement plus influente que la concentration de la solution osmotique. L'augmentation de ces 2 variables a entraîné des changements de la perte en caroténoïdes totaux de la tomate séchée.

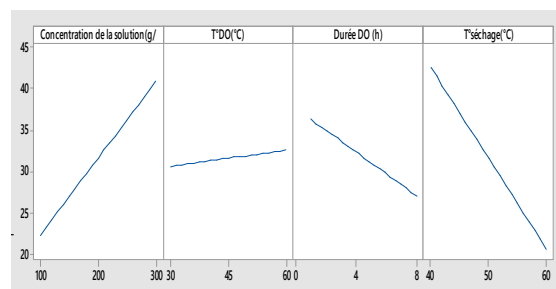


Fig. 4. Effets principaux des paramètres opératoires sur la perte en caroténoïdes totaux de la tomate séchée.

En effet, lorsque la concentration de la solution osmotique augmente, cela entraîne également une augmentation des pertes en caroténoïdes totaux mais lorsque la température du séchage augmente cela entraîne un effet contraire c'est-à-dire que les pertes en caroténoïdes diminuent. Les variables température et durée de la déshydratation osmotique se sont révélés non significatives. Leurs modifications n'ont entraîné aucun changement, sur le plan statistique, des pertes en caroténoïdes totaux de la tomate séchée.

L'équation de la régression de la perte en caroténoïdes totaux de la tomate séchée peut s'écrire comme suite :

$$\begin{aligned} \text{Perte en caroténoïdes totaux (\%)} = & 70,8 \\ & + 0,0923 \text{ Concentration de la solution osmotique (g/l)} \\ & + 0,065 \text{ T}^\circ \text{ de la déshydratation osmotique (}^\circ\text{C)} - \\ & 1,31 \text{ Durée de la déshydratation osmotique (h)} - \\ & 1,091 \text{ T}^\circ \text{ séchage (}^\circ\text{C)}. \end{aligned}$$

L'équation de la régression de la perte en caroténoïdes totaux de la tomate séchée montre

Tableau 6. Analyse de la variance des paramètres du procédé pour la perte en vitamine C

Source de variation	DL	SC	CM	F-Value	p-Value
Modèle de la régression	4	120,846	30,21	5,55	0,002
Concentration de la solution osmotique	1	52,068	52,07	9,56	0,005
T° de la déshydratation osmotique	1	6,171	6,171	1,13	0,297
Durée de la déshydratation osmotique	1	1,327	1,327	0,24	0,626
Température du séchage	1	61,280	61,28	11,25	0,002
Erreur	26	141,619	5,447		
Ajustement	21	138,916	6,615	12,24	0,006
Erreur pure	5	2,702	0,540		
Total	30	262,464			

DL : Degré de Liberté ; SC : Somme de carré des écarts ; CM : Carré moyen des écarts.

que l'effet moyen est de 70,8% sur la perte en caroténoïdes totaux et l'effet principal de la concentration de la solution osmotique (0,092%) est supérieur à celui de la température de la déshydratation (0,006%) et inférieur celui de la température du séchage (1,091 %) mais aussi inférieur à celui de la durée de la déshydratation osmotique (1,31%).

L'effet de la durée de la déshydratation osmotique se révèle essentiel et supérieur à celui de la concentration de la solution osmotique. Le modèle mis au point montre une contribution plus importante de la durée de traitement comparativement à la contribution de l'effet de variation des autres variables d'étude.

3.2.3. Effet des paramètres opératoires sur la perte en vitamine C

Le Tableau 6 donne l'analyse de la variance des paramètres du procédé pour la perte en vitamine C. L'analyse statistique (ANOVA) des résultats a montré que, dans la gamme des conditions opératoires étudiée, le modèle expérimental mis en œuvre influence de façon significative la perte en vitamine C de la tomate au cours du couplage (p-Value = 0,002 du modèle général) et que ces pertes en vitamine C de la tomate séchée ont été significativement affectées par la concentration de la solution osmotique (p-Value = 0,005) et la température du séchage (p-Value = 0,002). Par contre, les variables Durée de traitement osmotique et Température de la déshydratation n'ont pas induit des changements statistiquement significatifs.

La Fig. 5 donne l'effet de la concentration de la solution osmotique et de la température du séchage sur la perte en vitamine c de la tomate séchée.

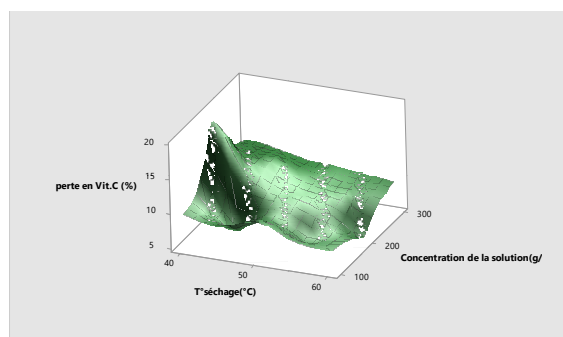


Fig. 5. Surface de réponse de la perte en vitamine C de la tomate séchée en fonction des variables concentration de la solution osmotique et température du séchage.

La Fig. 5 montre la surface de réponse de la perte en vitamine C de la tomate en fonction des variables concentration de la solution osmotique et température du séchage. Après un prétraitement par DII, la teneur en vitamine C continue à changer avec la variable opératoire concentration de la solution osmotique. Il en est de même pour la température du séchage où on observe que les pertes en acide ascorbique (vitamine C) augmentent avec la hausse de la température du séchage.

D'après Nadia Djendoubi (2012), la perte totale dépend aussi de la teneur en vitamine C en fin de l'opération de déshydratation osmotique. Elle dépend également de la teneur en eau du produit déshydraté.

La dégradation de la vitamine C observée au cours du séchage est due à la nature très instable de ce composé et aux conditions de déshydratation des produits. La structure de l'acide ascorbique comporte une fonction énediol très oxydable; sa dégradation résulterait donc, entre autre, d'une oxydation favorisée d'une part, par la présence d'oxygène renouvelé en permanence autour du produit et transporté sous forme dissoute dans l'eau libre de la tomate, et d'autre part, par le taux d'humidité résiduelle des tomates séchées.

La vitesse de dégradation de l'acide ascorbique dépend de la quantité d'oxygène dissous qui dépend de la température du séchage : plus la température est élevée plus la concentration en oxygène à l'équilibre est faible (Santos et Silvas, 2008). Par ailleurs, la vitamine C participe aux réactions de brunissement non enzymatique. La forme des courbes de dégradation de l'acide ascorbique durant le séchage traduirait une cinétique de dégradation impliquant plusieurs types de réactions. Donc pendant le séchage, la vitamine C est principalement perdue en raison de réactions sensibles à la chaleur, principalement d'oxydation.

L'évaluation de quelques nutriments caractéristiques de la qualité de la tomate, en l'occurrence la vitamine C indique, pour la vitamine C, des teneurs variables pour tous les échantillons séchés. Ce qui indique que l'oxydation de la vitamine C au cours du séchage semble être dépendante du prétraitement et de la température du séchage qu'a subi le produit frais.

La Fig. 6 donne les effets principaux des paramètres opératoires sur la perte en vitamine c de la tomate séchée.

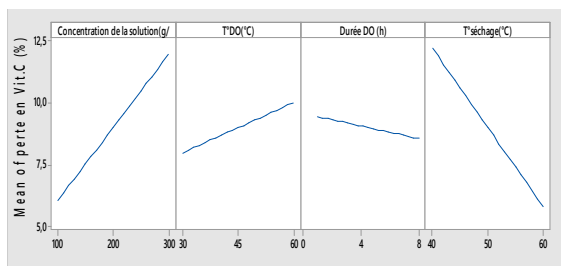


Fig. 6. Effets principaux des paramètres opératoires sur la perte en vitamine C de la tomate séchée.

La Fig. 6 montre les effets principaux des paramètres opératoires sur la perte en vitamine C de la tomate au cours du procédé de couplage. On y observe que la concentration de la solution osmotique et la température du séchage sont les variables qui influencent de manière significative la perte en vitamine C de la tomate au cours du procédé de couplage.

L'augmentation de la température du séchage de 40 à 60 °C conduit à une diminution sur les pertes en vitamines C ($p > 0,05$). L'augmentation de la concentration de la solution osmotique de 100 à 300 g/l, par contre, entraîne une augmentation des pertes en vitamines C. Contrairement à ces 2 variables significatives, l'augmentation de la température de la déshydratation osmotique et celle de la durée du traitement osmotique n'ont pas induit des changements statistiquement significatifs.

L'équation de la régression de la perte en vitamine c de la tomate séchée peut s'écrire comme suit:

$$\begin{aligned} \text{Perte en Vit. C (\%)} = & \\ & 16,62 + 0,02946 \text{ Concentration de la solution} \\ & \text{osmotique (g/l)} + 0,0676 \text{ T}^\circ \text{ de la déshydratation} \\ & \text{osmotique (}^\circ\text{C)} - 0,128 \text{ Durée de la déshydratation} \\ & \text{osmotique (h)} - 0,3196 \text{ T}^\circ \text{ séchage (}^\circ\text{C)} \end{aligned}$$

L'équation que voici montre que l'effet moyen des facteurs choisis est 16,62 % sur la perte en vitamine C et l'effet principal de la concentration (0,029 %) inférieur à celui de la température de la déshydratation, le coefficient étant égal à 0,067 %, de la durée de la déshydratation (0,128 %) et de la température du séchage (0,319 %). Le modèle mis au point montre une contribution plus importante de la température du séchage dans la variation de la perte en vitamine C

comparativement à la contribution à la variation des autres variables de l'étude.

3.2.4. Optimisation des réponses obtenues en fonction des variables opératoires

Dans cette partie, l'optimisation des conditions opératoires a été réalisée, tout d'abord, dans une approche monocritère. Ensuite l'optimisation multicritères combinatoire qui a consisté à choisir parmi l'ensemble des combinaisons les conditions optimales obtenues en monocritère déterminé par la méthodologie des surfaces de réponses (MSR) par rapport aux quatre facteurs étudiés en vue d'obtenir la meilleure combinaison de conditions optimales.

La méthodologie d'optimisation adoptée est une approche mathématique/numérique qui est basée sur l'annulation des dérivées partielles du modèle quadratique globale. Les valeurs optimales déterminées à l'aide du logiciel Minitab V.17 sont représentées dans la Fig. 7. Les résultats de cette Fig. montrent la solution des indicateurs de qualité optimisés. Cette solution est d'autant plus intéressante qu'elle correspond à travailler en utilisant la concentration la plus faible de chlorure de sodium (100 g/L), la température de la solution osmotique basse (30°C) et une courte durée de la déshydratation osmotique (1heure) couplée à un séchage à une température relativement élevée (60°C). Il est à noter que la durée totale du traitement est dans ce cas de 42 heures. Les valeurs de conditions opératoires obtenues conduisent à un produit final avec une perte en acide ascorbique de 2,29 %, une perte en caroténoïdes totaux de 15,17% et une teneur minimale en cendre de 0,84 %.

La solution obtenue permet d'avoir les meilleures réponses pour la majorité des critères examinés. Elle est plus intéressante puisqu'elle montre les conditions optimales pour une optimisation de la réponse en question. L'optimum pour un critère de qualité n'est pas forcément l'optimum pour l'autre. Ceci peut être associé aux mécanismes de dégradation complexes et variés. Plusieurs autres ont démontré qu'une déshydratation à courte durée et à température élevée permet d'obtenir une meilleure qualité du produit fini.

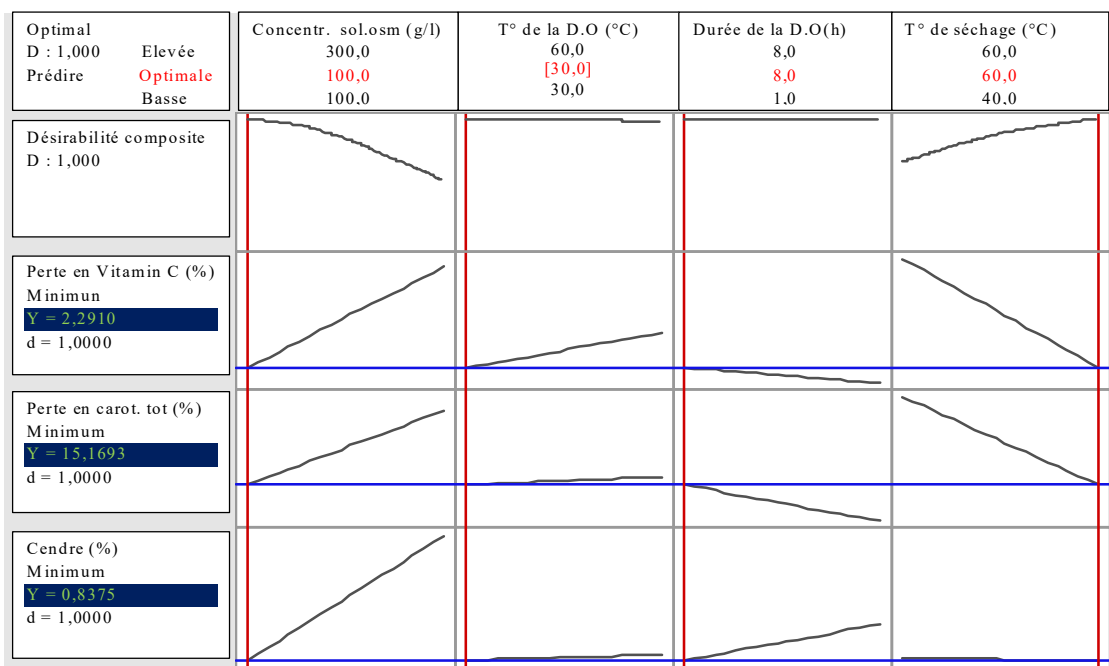


Fig. 7. Diagramme d'optimisation des réponses étudiées en fonction des variables opératoires.

La désirabilité composite est égale à 1, ce qui indique que les paramètres ont atteint des résultats favorables pour toutes les réponses dans leur ensemble. Il en est de même de leurs désirabilités individuelles qui indiquent que les paramètres sont efficaces pour la minimisation de la perte en vitamine C ($d=1,000$), de la perte en caroténoïdes totaux ($d=1,000$) et de la teneur en cendre ($d=1,000$).

4. CONCLUSION

La présente étude avait pour objectif général de contribuer à la recherche des voies de stabilisation et de valorisation de la tomate fraîche produite localement et visait spécifiquement l'étude de l'impact du couplage de la déshydratation osmotique et du séchage sur la qualité nutritionnelle de la tomate séchée. L'approche adoptée consistait à mener les expériences de la déshydratation osmotique et du séchage couplés sur quelques critères de qualité du fruit (teneur en caroténoïdes totaux, teneur en vitamine C et en cendre brute) en prenant la tomate comme fruit-modèle.

Un plan d'expériences composite centré à quatre facteurs indépendants (concentration en chlorure de sodium de la solution osmotique : 100 - 300 g/L, température de déshydratation osmotique : 30 - 60°C, durée de la déshydratation osmotique : 1 - 8 heures, température du séchage : 40 - 60 °C) et cinq

niveaux a été établi à l'aide du Minitab V.17 (MINITAB, Inc., State College, PA) pour évaluer et modéliser l'impact du couplage de la déshydratation osmotique et du séchage sur la qualité de la tomate séchée.

Les résultats obtenus nous ont permis de dire que les facteurs Température du séchage et Concentration de la solution osmotique ont une influence significative ($p < 0,05$) sur la perte en vitamine C et en caroténoïdes totaux de la tomate, les facteurs durée du traitement osmotique et concentration de la solution osmotique ont par contre une influence significative ($p < 0,05$) sur la teneur en cendre de la tomate séchée. L'optimisation de la déshydratation est assurée en couplant la déshydratation osmotique de la tomate fraîche (concentration en sel de 100 g/L, température de 30°C et durée de 1 heure) à un séchage à une température de 60°C. Ces conditions de travail ont conduit à une perte minimale en acide ascorbique de 2,29%, en caroténoïdes totaux de 15,17 % et à une teneur minimale en cendre de 0,84 %, des modèles prédictifs ont été proposés pour relier les attributs de qualité du produit fini aux différentes variables opératoires de la déshydratation osmotique combinée au séchage.

REFERENCES

Aboubakar Danjouma A.K., Fadi C.P. Kouebou, A. Kameni C., Tchiegang C., Yezouma, et

- Desmorieux H., (2005), Valorisation des légumes tropicaux par le séchage: étude de quelques conditions de production et de conservation de la tomate séchée.
- Azoubel P.M., Murr F.E.X, (2004), Mass transfer kinetics of osmotic dehydration of cherry tomato. Journal of Food Engineering, 61, p. 291–295.
- Belaisil Syrine et Dokari Amina, (2018), Cinétique de conservation (congélation) des tomates et suivi de la stabilité des caroténoïdes. Mémoire de fin d'études de master /sciences biologiques/ Université Akli Mohand Oulhadj – Bouira.
- DAPS/MDR, (1994), Filière tomate. Rapport d'étude, Ministère du Développement Rural, République du Bénin, Cotonou, 13 p.
- DPP/MAEP, (2008), Annuaire statistique des productions agricoles. Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche, République du Bénin.
- Fagbohoun O. et Kiki D., (1999), Aperçu sur les principales variétés de tomate locales cultivées dans le sud du Bénin. Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin, 24: 10-21.
- Femenia Antonio, Pablo Garcia-Pascual, Susana Simalaud C. R., (2003), Effects of heat treatment and dehydration on bioactive polysaccharide acemannan and cell wall polymers from *Aloe barbadensis* Miller. Carbohydrate Polymers, 51 (4,1), 397-405.
- Guenneugues P, (1986), Etude thermodynamique des transferts de masse en déshydratation osmotique : DEA. Massy, France, ENSIA.
- Igwe, E. C. et Isonguyo, E. N. In C. Kapseu et J. Kayem (Eds), (1999), International workshop on drying and improvement of shea and canarium. Presses Univ.de Yaoundé, Cameroun, pp. 213-220.
- Islam M.N., Flink J.M.'1982), Dehydration of potato, Osmotic concentration and its effects on air drying behaviour. Journal of Food technology, 17, 1982, p. 387-403.
- Jayaraman K.S., Das Gupta D.K., Babu Rao N., (1990), Effect of pre-treatment with salt and sucrose on the quality and stability of dehydrated cauliflower. International Journal of Food Science and Technology, 25, p. 47–60.
- LBT, (2005), Recueil des modes opératoires pour les analyses alimentaires.
- Malakasa Mandefu A.G, Mutambel Hity D., Kizungu Vumilia R. and Sumbu Zola E., (2019), Study of the coupling of osmotic dehydration and tomato (*Lycopersicon esculentum*) drying by the response surface methodology. IJFR 6 (2019) 29-40.
- Maltini E., Torreggiani D., Venir E., (2003), Water activity and the preservation of plant foods. Food Chemistry, 82 (1), p. 79-86.
- Melle Sari Mohammed Fadia Wafaa, (2017), Comparaison entre deux méthodes de dosage de la vitamine C. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de master en biologie Option : « Alimentation et nutrition ». Université Aboubekr Belkaid de Tlemcen/ République Algérienne Démocratique et Populaire.
- Michelline Agassounon Djikpo Tchibozo, Selma Gomez, Fidele Paul Tchobo, Mohamed M. Soumanou et Fatiou Toukourou, (2012), Essai de conservation de la tomate par la technique de la déshydratation imprégnation par immersion (DII). Int. J. Biol. Chem. Sci. 6(2): 657-669.
- Moumenir Rebiba et Boutadjine Djihad, (2016), Valorisation de la tomate pour l'obtention d'une poudre riche en constituants antioxydants. Mémoire de Master académique/Faculté des Sciences Appliquées/Université KASDI MERNAH OUARGLA.
- Nadia Djendoubi, (2012), Etude cinétique et optimisation multicritères du couplage d'déshydratation imprégnation par immersion-séchage convectif de la poire, la pomme et l'abricot. Thèse de doctorat 'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech) Spécialité : Génie des Procédés Alimentaires.
- Perveen R, Suleria HA, Anjum FM, Butt MS, Pasha A I, Ahmad, S. (2013), Tomato (*Solanum lycopersicum*) carotenoids & lycopenes chemistry; Metabolism, absorption, nutrition and allied health claims- A comprehensive review. Crit Rev Food Sci Nutr. Aug 24.
- Ponting J.D., (1973), Osmotic dehydration of fruits. Resents modifications and applications. Process Biochemistry, 8, p. 18-20.
- Prothon F., Ahrne L.M., Funebo T., (2001), Effects of combined osmotic and microwave dehydration of apple on texture, microstructure and rehydration characteristics. LebensmittelWissenschaft und -Technologie, 34(2), p. 95-101.
- Raffo A, Nicoli S, Nardo N, Baiamonte I, D'aloise A, Paoletti F., (2012), Impact of different distribution scenarios and recommended

- storage conditions on flavor related quality attributes in ripening fresh tomatoes. *J Agric Food Chem.* Oct 24; 60 (42):10445-55.
- Raoult-Wack A.L., (1884), Recent advances in the osmotic dehydration of foods. *Food Science and Technology*, 5, p. 255-260.
- Rert Ndjouenkeu, Womeni, C. Kapseu, Felicite Tchouanguép Mbiapo, M. Parmentier & J. FanniI, (2007), Séchage des amandes de karité et qualité du beurre: impact du séchage traditionnel au soleil. *Tropiculturn*, 25, 4, 240-247.
- Santos P.H.S., Silva M.A, (2008), Retention of vitamin C in drying processes of fruits and vegetables – a review. *Drying Technology*, 26, 2008, p. 1421–1437.
- Singh B., Kumar A., Gupta A.K., (2007), Study of mass transfer kinetics and effective diffusivity during osmotic dehydration of carrots cubes. *Journal of Food Engineering*, 79, p. 471-480.
- Tabala, (2016), Evaluation et modélisation des effets des paramètres de la déshydratation osmotique de la tomate (*Lycopersicon esculentum* var. caraïbo). Mémoire de fin d'études/Faculté des Sciences Agronomiques/Université de Kinshasa.
- Vega-Galvez, Lemus-Monsaca, Bilbao-Sainz, Fito and Andres (2008), Effect of air drying temperature on the quality of rehydrated dried red bell pepper (var. Lamuyo). *JF Eng.* Volume 85, Issue 1, March, Pages 42-50.
- Vogel JT, Tieman DM, Sims CA, Odabasil AZ, Clark DG, Klee HJ., (2010), Carotenoid content impacts flavor acceptability in tomato (*Solanum lycopersicum*). *J Sci Food Agric.* Oct; 90 (13):2233-40.
- Zhang Z, Liu L, Zhang M, Zhang Y, Wang Q., (2014), Effect of carbon dioxide enrichment on health-promoting compounds and organoleptic properties of tomato fruits grown in greenhouse. *Food Chem.* 2014 Jun 15; 153:157-63.