

Optimisation de la déshydratation osmotique des carottes en utilisant la méthodologie des surfaces de réponses

Ali Ferradji, Djamila Belhachat, Feriel Sabrine Ait Chaouche, Hakima Acheheb

Ecole Nationale Supérieure Agronomique Alger, Département de Technologie Alimentaire
a_ferradji@yahoo.fr; djamilaina@hotmail.com; aitchaoucheferiel@yahoo.fr; acheheb.hakima@hotmail.fr

Résumé

La méthodologie de surface 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. Les expériences ont été réalisées en utilisant le Plan Composite Central. Les variables indépendantes de la déshydratation osmotique sont la température (25 - 65 °C), la durée du traitement (30 -240 minutes), la concentration de la solution de saccharose (45 - 65% w/w) et le blanchiment (0-180 s). 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 carottes sont obtenues à : une température de 55°C, une concentration de 60°Brix, un blanchiment de 30 secondes et une durée de déshydratation de 180 min. Dans ces conditions le pourcentage de la perte en eau et en poids et le pourcentage du gain en solide sont respectivement de 74,12 (g/100 g poids initial), 69,56 (g/100 g poids initial) et 7,13 % (g/100 g poids initial).

Mots-clés: optimisation, déshydratation osmotique, carottes, solution de sucre, méthodologie de surface de réponse

1. Introduction

La Carotte (*Daucus Carota*) appartient à la famille des Apiacées, originaire d'Afghanistan, après avoir traversé l'Asie mineur, elle atteint les rives de la méditerranée et aurait été introduite en Europe occidentale par les arabes, lors de l'invasion de la péninsule Ibérique (Lemoine, 1999). Les variétés actuelles sont dominées pour le marché de frais par le type demi-longue Nantaise en carotte de primeur. Parmi les variétés de saison nous citons « Napoli, Presto, Premia, Carlo, ». La carotte se distingue par une teneur relativement élevée en caroténoïdes, en particulier le β - Carotène. Son jus hautement régénérateur semble particulièrement bénéfique pour le foie. De ce fait, sa consommation est favorable dans le cas des gastrites et d'ulcères. La carotte renferme des réserves considérables de sucres, principalement du saccharose et des sucres simples tels que glucose et fructose. Sa teneur en sucres solubles varie en fonction de la variété et de l'époque de récolte, de 2 à 8g pour 100g de carotte fraîche. Il est noté la présence de quelques Acides Aminés (AA) libres (glutamique), des substances terpéniques et phénoliques qui interviennent dans l'agrément gustatif des préparations de ce légume [1]. La déshydratation osmotique des fruits, entiers ou découpés en morceaux, est une technique basée sur la mise en contact avec des solutions fortement concentrées [2]. Ce contact conduit à deux transferts de matière simultanés à contre courant : un important départ d'eau du produit vers la solution et un faible transfert de soluté de la solution vers le produit [3]. L'évolution de perte en eau et du gain en substances solides solubles au cours de la déshydratation osmotique dépend d'une part des propriétés des tissus végétaux et du mode de découpe des produits et d'autre part des conditions de traitement, essentiellement la température, la durée, le mode de mise de contact des phases, la concentration et la composition de la solution ([4] [5]). Une synthèse des connaissances sur la déshydratation osmotique des fruits a été réalisée récemment par Bchir [6]. La cinétique en continu de la déshydratation osmotique des fruits et légumes est souvent étudiée par le modèle mathématique proposé par Azuara [7]. L'optimisation de la déshydratation osmotique des fruits et légumes est évaluée en utilisant la Méthodologie statistique des Surface de Réponse ([8]). Etant donné qu'il y a très peu de travaux scientifiques effectués sur la déshydratation osmotique des carottes, l'objectif de ce travail est de contribuer à l'étude de l'optimisation de la déshydratation osmotique de ce fruit en utilisant la Méthodologie des Surfaces de Réponse (MSR).

2. Matériel et méthodes

2.1. Matériel végétal

Les carottes utilisées pour l'expérimentation sont de la variété Nantaise provenant de la région de Mitidja (Alger). Les carottes récoltées en avril 2011, à l'état mûr ont une couleur orangée, un poids moyen de 79,86g, une longueur de 14,5cm et un diamètre de 3cm.

2.2. Protocole expérimental

Les carottes sont lavées et découpées en dés. Elles subissent un blanchiment dans de l'eau bouillante durant 0, 30, 60, 120 et 180 secondes puis refroidies dans de l'eau glacée afin d'arrêter l'effet du blanchiment. La durée de trempage des échantillons dans la solution de métabisulfite de sodium à 1% est de 60 secondes. Les échantillons sont aussi trempés dans une solution de maïzena à 2.5% pendant 4 minutes. Les carottes sont par la suite déshydratées par osmose à 25, 35, 45, 55 et 65°C dans une solution concentrée de saccharose à 45, 50, 55, 60 et 65°Brix pour les durées de 30, 60, 120, 180 et 240 minutes. Le rapport échantillon/solution de déshydratation est de 1:4. La solution de saccharose contenant les échantillons est placée dans un bain marie qui est déposé sur un agitateur réglé à une vitesse de 150 oscillations par minute. Les échantillons sont retirés à des intervalles périodiques. L'excès de la solution de saccharose est éliminé par du papier absorbant. Après cette opération les échantillons sont pesés et remis dans la solution osmotique pour effectuer la déshydratation en continu. A la fin des durées de déshydratation la teneur en eau est déterminée par un humidimètre à infrarouge de marque Sartorius.

2.2.1. Réhydratation

La teneur en eau des carottes déshydratées par osmose est de 48.9%. A l'aide d'une soufflerie de laboratoire réglée à une température de 40°C la teneur en eau est réduite à 22.03 %. La réhydratation des carottes séchées a été effectuée en trempant 10 à 12g d'échantillon dans 300ml d'eau à température ambiante pendant 12 heures. Après réhydratation les échantillons sont débarrassés de l'excès d'eau en utilisant du papier absorbant et pesés. Le rapport de réhydratation est calculé comme suit:

$$\text{Rapport de réhydratation} = \frac{\text{Poids après le séchage}}{\text{Poids après la réhydratation}}$$

2.2.2. Cinétique de déshydratation osmotique en continu proposée par AZUARA [7] :

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 [8]. Les équations utilisées pour le calcul des pourcentages de la perte en eau (PE), en poids (PP) et du gain en substances solides solubles (GS) au cours du transfert de masse à contre courant sont les suivantes :

$$\text{PE} = \frac{s_1 \times t \times \text{PEe}}{1 + s_1 \times t} \quad (1) \quad \text{GS} = \frac{s_2 \times t \times \text{GSe}}{1 + s_2 \times t} \quad (2)$$

Où: **PE** : quantité d'eau éliminée du produit au temps t (g/100g), **GS** : quantité des substances solides soluble transférée au produit au temps t (g/100g), **PEe** : quantité des substances solides soluble transférée au produit à l'équilibre, **GSe** : Pourcentage du gain en solide à l'équilibre, **t** : temps en secondes, **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) :

$$\text{PP} = \text{PE} - \text{GS} \quad (3)$$

2.2.3. Plan expérimental et analyse statistique

La méthodologie de surface de réponse (MSR) a été utilisée pour évaluer les principaux effets du procédé de la déshydratation osmotique sur la perte en eau (PE) et le gain en solide (GS) dans les carottes. Un plan composite central a été utilisé pour les variables indépendantes suivantes : température (25–65°C), temps de traitement (30–240 minutes), concentration de solution de saccharose (45–65%) et blanchiment (0–180 secondes) (Tableau 1). Les 30 expériences générées sont analysées par la méthodologie des surfaces de réponse en utilisant le logiciel statistique Design expert 8.7.0.1.

Tableau 1 : Les niveaux des différentes variables sous la forme codée et non-codée pour la déshydratation osmotique des carottes

Variables indépendantes	Niveaux et rangs				
	- 2	- 1	0	1	2
Température (°C)	25	35	45	55	65
Temps (min)	30	60	120	180	240
Concentration (°Brix)	45	50	55	60	65
Blanchiment (sec)	0	30	60	120	180

3. Résultats et discussion

3.1. Evaluation de la cinétique en continu de la déshydratation osmotique des tranches des carottes

La Figure 1 présente l'évolution des pourcentages de perte en poids (PP), perte en eau (PE) et du gain en substances solubles solubles (GS) calculés par les équations (1), (2) et (3). Au cours de la déshydratation osmotique effectuée à 45°C dans une solution de saccharose de 55° Brix, les dés de carotte perdent beaucoup plus d'eau qu'elles ne gagnent de saccharose. Dans ces conditions après 120 min la perte en eau et le gain en substances solubles atteignent respectivement 78.29% et 14.85%.

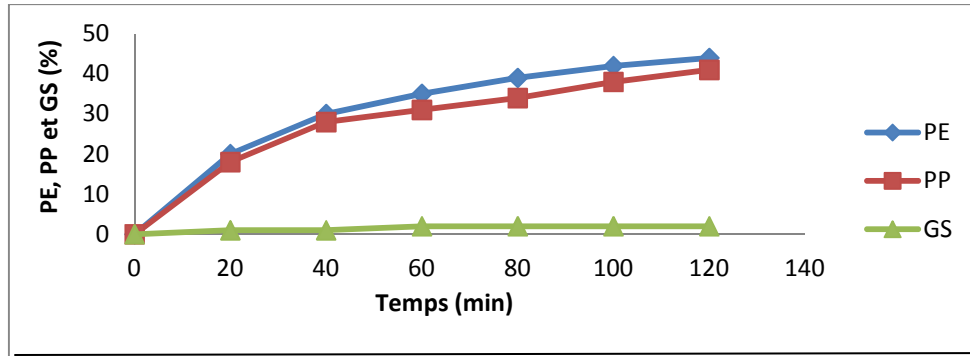


Figure 1 : L'évolution de la perte en eau (PE), de la perte en poids (PP) et du gain en solides (GS) au cours de la déshydratation osmotique à 45°C et à 55°Brix de saccharose.

3.2. Ajustement du modèle

Les valeurs de R^2 indiquent que plus de 95 % des données expérimentales sont compatibles avec les valeurs des données prévues par le modèle (Tableau 2) et seulement moins de 5% de l'ensemble des variations ne sont pas expliquées par le modèle. L'expression mathématique de la relation à la réponse avec les variables sont indiqués ci-dessous :

$$PE = +78.29 +1.43*A +8.50*B -0.59*C+2.88*D +0.76*A* B-0.94*A*C+0.46*A*D -1.56*B *C-0.88*B*D +0.23*C*D -2.54*A^2 - 1.63*B^2 - 3.04*C^2-2.67*D^2$$

$$PP = +65.20 +2.94*A +9.07*B -0.20*C +2.64*D -0.69 *A*B -2.27*A*C -0.15*A*D-2.11*B*C -0.59*B*D -0.35*C*D -1.85*A^2 -1.84*B^2 -2.87*C^2 -1.80*D^2$$

$$GS = +14.85 -1.57*A -0.57 *B -0.43*C +0.95*D +0.74*A* B +1.15*A*C+0.89*A*D +0.75 *B*C -0.17*B*D -0.49*C*D -1.06*A^2 +0.38*B^2 -0.42*C^2 -1.25*D^2$$

Où PE, PP et GS sont respectivement la perte en eau (%), perte en poids (%) et gain en solide (%) et A, B, C, et D sont respectivement les valeurs codées des variables testées suivantes : blanchiment (sec), température (°C), temps (min) et concentration de la solution de saccharose (%p/p). Plus l'amplitude de la valeur de F est élevée et celle de P est faible, plus le coefficient correspondant est significatif. Les valeurs de "Prob > F" inférieures à 0.0500 indiquent que les facteurs du modèle sont significatifs. Les valeurs supérieures à 0.10 indiquent que les facteurs du modèle ne sont pas significatifs. Pour cette étude A, B, C, D, AB, AD, A², C²; A, B, C, D, AB, AD, A², B², C² et A, B, C, D, AB, AD, BC, CD, A², B², C², D² sont les termes du modèle ayant des effets significatifs respectivement sur PE, PP et GS.

Tableau 2 : Les conditions expérimentales et les valeurs de réponse observées Plan Composite Central

Niveaux	Blanchiment	Température	Temps	Concentration	PP	PE	GS
1	1.00	1.00	1.00	-1.00	61.36	73.22	11.03
2	0.00	0.00	0.00	0.00	65.2	78.29	14.85
3	1.00	1.00	-1.00	1.00	75.32	84.38	11.76
4	-1.00	1.00	1.00	1.00	65.07	72.57	10.88
5	-2.00	0.00	0.00	0.00	52.76	65.36	13.8
6	0.00	0.00	0.00	0.00	65.2	78.29	14.85
7	-1.00	-1.00	1.00	1.00	52.06	66.83	12.69
8	0.00	0.00	0.00	0.00	65.2	78.29	14.85
9	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	43.45	59.45	18.42
10	-1.00	1.00	1.00	-1.00	58.62	71.57	13.57
11	1.00	1.00	1.00	1.00	64.39	78.67	13.61
12	0.00	0.00	0.00	2.00	62.84	74.47	12.17
13	1.00	-1.00	1.00	-1.00	46.89	54.15	8.9
14	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	44.04	56.62	12.96

15	1.00	1.00	-1.00	-1.00	67.93	76.17	7.34
16	2.00	0.00	0.00	0.00	65.62	73.54	8.01
17	0.00	2.00	0.00	0.00	77.71	90.13	15.32
18	0.00	0.00	0.00	0.00	65.2	78.29	14.85
19	-1.00	1.00	-1.00	-1.00	62.64	75.71	12.36
20	0.00	-2.00	0.00	0.00	40.75	56.09	17.98
21	0.00	0.00	0.00	-2.00	55.93	63.46	8.11
22	0.00	0.00	2.00	0.00	56.57	66.58	12.08
23	1.00	-1.00	-1.00	-1.00	47.81	58.24	8.37
24	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	35.13	52.62	16.93
25	0.00	0.00	0.00	0.00	65.2	78.29	14.85
26	0.00	0.00	0.00	0.00	65.2	78.29	14.85
27	1.00	-1.00	1.00	1.00	51.39	62.96	12.74
28	0.00	0.00	-2.00	0.00	53.62	68.34	14.79
29	1.00	-1.00	-1.00	1.00	56.53	63.04	12.03
30	-1.00	1.00	-1.00	1.00	65.82	77.59	14.09

Les effets linéaires, quadratiques et interactives de toutes les variables sur la réponse sont évalués par l'analyse de la variance du modèle quadratique de surface de réponse. Le signe et l'amplitude des coefficients précisent les effets des variables sur la réponse. Le signe négatif du coefficient signifie que la réponse diminue lorsque la variable augmente, tandis que le signe positif indique une augmentation de la réponse. Pour l'interaction positive le niveau de l'une des variables interactives pourrait augmenter pendant que l'autre diminue afin d'aboutir à une valeur constante de la réponse [9].

3.2.1. Effet sur la perte en eau

Les p-valeurs indiquent que les termes A, B, D, BC, A^2 , B^2 , C^2 et D^2 ont des effets significatifs ($p < 0.05$) sur la perte en eau pendant le processus de la déshydratation osmotique. L'amplitude relative des coefficients d'estimation indique l'effet significatif de la température de la solution osmotique (8,50), suivi par la concentration de la solution (2,88) et par le blanchiment (1,43) et elle indique aussi l'effet non significatif de la durée du processus (-0,59). Ces résultats indiquent que la perte en eau augmente avec l'augmentation de la température de la solution osmotique, de la concentration de la solution et du blanchiment. Tous les termes quadratiques ont des effets non significatifs sur la perte en eau comparés aux termes linéaires des variables du processus. Plus loin, les interactions du 'blanchiment et la température', du 'blanchiment et la concentration' et du 'temps et de la concentration' ont un effet significatif, tandis que les interactions du 'blanchiment et le temps', de 'la température et du temps', de 'la température et de la concentration' et ont un effet non significatif sur la perte en eau (Figure 2).

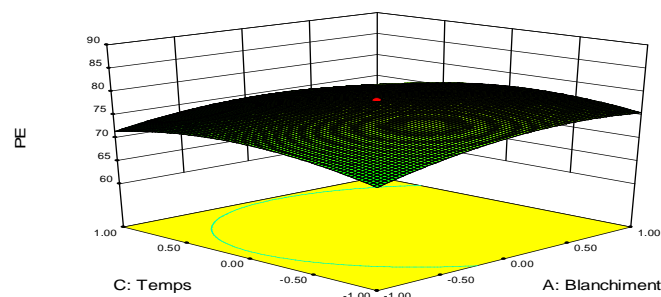


Figure 2 : Surface de réponse et tracé de contour de l'effet du temps et du blanchiment sur la perte en eau des carottes déshydratées dans un sirop de saccharose.

3.2.2. Effet sur le gain en solides

Les p-valeurs indiquent que les termes A, B, C, D, AB, AC, AD, BC, CD, A², B², C² et D² ont des effets significatifs ($p < 0.05$) sur le gain de solide pendant le processus de la déshydratation osmotique (Tableau 3). L'amplitude relative des coefficients d'estimation indique l'effet positif maximal de la concentration de la solution osmotique (0,95) et l'effet non significatif du blanchiment (-1,57), suivi par la température de la solution (-0,57) et par la durée de processus (-0,43). Ces résultats indiquent que le gain de solide augmente avec l'augmentation de la concentration de la solution osmotique et il diminue avec l'augmentation du blanchiment, de la température de la solution osmotique et de la durée du processus. Les termes quadratiques du blanchiment, du temps et de la concentration ont des effets négatifs, tandis que la température a un effet significatif sur le gain de solide. Plus loin, les interactions du 'blanchiment et la température', du 'blanchiment et le temps', 'blanchiment et la concentration' et de 'la température et du temps' ont un effet significatif, tandis que les interactions de 'la température et de la concentration' et du 'temps et de la concentration' ont un effet non significatif sur le gain de solide (Figure 3).

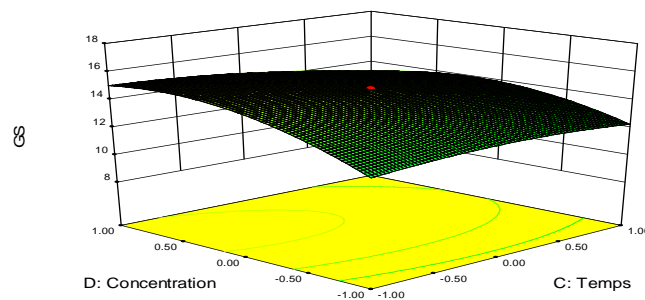


Figure 3 : Surface de réponse et tracé de contour de l'effet du temps et de la concentration sur le gain en solide des carottes déshydratées dans un sirop de saccharose.

Tableau 3 : Analyse des variations (ANOVA) pour les surfaces de réponse quadratique

Source	PP			PE			GS		
	Coefficients	MS	P value	Coefficients	MS	P value	coefficients	MS	P value
Modele	65.20	4189	< 0.0001	78.29	3854	< 0.0001	14.85	287	< 0.0001
A	2.94	216	< 0.0001	1.43	267	0.0040	-1.57	15.85	< 0.0001
B	9.07	2789	< 0.0001	8.50	2454	< 0.0001	-0.57	17.69	0.0004
C	-0.20	280	0.6321	-0.59	96.89	0.1810	-0.43	55.49	0.0036
D	2.64	4.31	< 0.0001	2.88	6.75	< 0.0001	0.95	2.25	< 0.0001
AB	-0.69	5.89	0.1965	0.76	12.84	0.1609	0.74	0.031	0.0002
AC	-2.27	0.86	0.0005	-0.94	0.66	0.0872	1.15	4.19	< 0.0001
AD	-0.15	0.17	0.7803	0.46	0.38	0.3856	0.89	1.82	< 0.0001
BC	-2.11	14.82	0.0009	-1.56	0.35	0.0082	0.75	3.22	0.0002
BD	-0.59	48.67	0.2645	-0.88	31.75	0.1068	-0.17	6.67	0.2905
CD	-0.35	53.43	0.5045	0.23	11.54	0.6550	-0.49	8.09	0.0059
A ²	-1.85	88.95	0.0003	-2.54	180	< 0.0001	-1.06	37.54	< 0.0001
B ²	-1.84	66.56	0.0003	-1.63	54	0.0009	0.38	11.67	0.0054
C ²	-2.87	154	< 0.0001	-3.04	182	< 0.0001	-0.42	34.83	0.0024
D ²	-1.80	82	0.0004	-2.67	229	< 0.0001	-1.25	5.13	< 0.0001
Manque d'ajust.		78			98.22			1.16	< 0.0001
R ²		0.98			0.97			0.9718	
R ² ajusté		0.96			0.95			0.9454	
R ² prédit		0.84			0.77			0.785	

3.2.3. Aptitude à la réhydratation de la nêfle séchée et reprise de la forme

Les dés de carotte utilisés pour ce test ont été séchés auparavant, à une teneur en eau finale de 22.03%. Au bout de 12h d'absorption d'eau, à une température ambiante de 28 °C la teneur en eau a augmenté jusqu'à 91.4%. La

récupération de la forme et de l'épaisseur des échantillons des carottes serait due leur richesse en fibres qui participent activement au gonflement du tissu [10] (Figure 4).



Figure 4: Aspects des carottes séchées avant et après réhydratation.

4. Conclusion

Pour cette étude la Méthodologie de Surface de Réponse a été utilisée pour déterminer les conditions optimales du procédé de la déshydratation osmotique des carottes afin d'obtenir un rendement maximal pour la perte en eau et en poids et un rendement minimal pour le gain en solide. L'analyse de variance a montré que les effets de toutes les variables du procédé (température, temps, concentration et blanchiment) sont statistiquement significatifs. Des modèles polynomiaux ont été obtenus pour prédire la perte en eau et en poids et le gain en solide. Les conditions optimales pour des pertes maximales en eau et en poids, et un gain minimal en substances solides solubles sont : une température de 55°C, une concentration de 50° Brix, un blanchiment de 120 sec et une durée déshydratation de 60 min. À ces conditions les pourcentages de perte en eau, de perte en poids et du gain en solide sont respectivement de 76.17%, 67.93% et 7.34%.

Références

- [1] Villeneuve F., 1999. La carotte, p.p.45-63. Dans Technologie des légumes par Tirilly Y et Bourgeois CM Collection science et techniques agro alimentaires. Paris, Lavoisier, 558p.
- [2] Torreggiani D., 1993. Osmotic dehydration in fruits and vegetable processing. *Food Res. Int.*, 26, 59-68.
- [3] Hawkes J. et Flink J.M., 1978. Osmotic concentration of fruits slices prior to freeze dehydration. *J. Food Process. Preserv.*, 2, 265-284.
- [4] Raoult-Wack A.L., 1994. Advances in osmotic dehydration. *Trends Food Sci. Technol.*, 5, 255-260.
- [5] Sutar P.P. et Gupta, D.K., 2007. Mathematical modeling of mass transfer in osmotic dehydration of onion slices. *J. Food Eng.*, 78, 90-97.
- [6] Bchir B., Besbes S., Giet J.M., Attia H., Blecker C., 2011. Synthèse des connaissances sur la déshydratation osmotique. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 15(1), 129-142.
- [7] Azuara E., Beristain C.I. et Gutierrez G. F., 1998. A method for continuous kinetic evaluation of osmotic dehydration. *Lebensm.-Wiss. u.-Technol.*, 31, 317-321 ..
- [8] Mudahar G.S., Toledo R.T., Floros J.D. et Jen, J.J., 1989. Optimization of carrot dehydration process using response surface methodology. *J. Food Sci.*, 54, 714-719.
- [9] Madamba, P.S., 2003. Thin layer drying models for osmotically predried young coconut. *Dry. Technol.*, 21, 1759-1780.
- [10] Bimbenet J.J., Bonazzi C. et Dumoulin E., 1996. L'eau de séchage, stockage et réhydratation. In *L'eau dans les aliments*, Tec et Doc, Lavoisier, Londres, Paris, New York.