



## The 1<sup>st</sup> International Conference on Local Resource Exploitation

[www.lorexp.org](http://www.lorexp.org) / [info@lorexp.org](mailto:info@lorexp.org)  
REF: LOREXP\_2021\_A1234 Pages: 447-467



### Optimisation de la Déshydratation Imprégnation par Immersion de mangues (*Mangifera indica* L. Moench) et modélisation des cinétiques de transfert de matière.

#### *Optimization of the osmotic dehydration of mangoes (*Mangifera indica* L. Moench) and modelling of the kinetics of material transfer.*

Christian Tsopwo Zena<sup>1</sup> and Yvette Jiokap Nono<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Process Engineering, National Advanced School of Agro-industrial Sciences, ENSAI, Ngaoundere University, P.O. Box 455 Ngaoundere, Cameroon.

<sup>2</sup> Laboratoire d'Analyses, Simulation et Essais (LASE), Département de Génie Chimique et Environnement, IUT, Université de Ngaoundéré-CAMEROUN, B.P. 455.

\* Auteur Correspondant : [jiokapnonoy@yahoo.fr](mailto:jiokapnonoy@yahoo.fr)

#### RÉSUMÉ :

L'objectif de ce travail était de déterminer les conditions optimales de la Déshydratation Imprégnation par Immersion (DII) des tranches de mangue (*Mangifera indica* L.) à 35 °C. A cet effet, le plan de surface de réponse de Doehlert a été utilisé, avec comme facteurs le ratio volume de solution de DII/ masse du fruit (6:1 – 13:1 mL/g) ; le temps (120 – 360 minutes) et le degré Brix de la solution (45 – 65 g/100 g). Les cinétiques de perte d'eau (PE) et de gain en soluté (GS) pendant la DII ont été effectuées sur l'optimum issu du plan de Doehlert et ont été modélisées afin d'avoir plus d'informations sur le comportement des tranches de mangue pendant la DII. Le coefficient de diffusion de l'eau des tranches de mangues et le coefficient de diffusion du soluté pendant la DII ont été déterminés en utilisant le modèle modifié de Crank. Les conditions optimales de DII ont été de 6:1 (mL/g) pour le ratio d'immersion, un temps d'immersion de 245 minutes et une concentration en soluté de la solution de DII de 61,6 °Brix. Ces conditions opératoires ont permis d'obtenir une perte d'eau (PE) de  $47,626 \pm 1,793$  (g/100 g) et un gain en soluté (GS) de  $6,67 \pm 1,04$  (g/100 g). Les modèles de Page, de Weibull et de Crank modifié décrivent au mieux les cinétiques de PE et de GS pendant la DII avec des R<sup>2</sup> tous supérieurs à 0,98 et des erreurs relatives moyennes (MRE) toutes inférieures à 0,06. Les coefficients de diffusion de l'eau et du soluté ont été respectivement de  $1,4314 \cdot 10^{-09}$  m<sup>2</sup>/s et  $3,2374 \cdot 10^{-09}$  m<sup>2</sup>/s. Les résultats obtenus dans ce travail vont servir au dimensionnement des équipements de production.

**Mots clés :** Mangue, Déshydratation Imprégnation par Immersion, Optimisation, Cinétiques, Modélisation.

#### ABSTRACT:

The objective of this work was to determine the optimal conditions for mango (*Mangifera indica* L.) osmotic dehydration in concentrated solutions of sucrose, at 35 °C. For this purpose, the Doehlert response surface methodology was used, with as factors the ratio of volume of concentrated solution/fruit mass (6:1 – 13:1 mL / g); time (120 – 360 minutes) and Brix solution (45 – 65 g/100 g). The kinetics of water loss (PE) and solute gain (GS) during the DII were carried out on the optimum obtained from the Doehlert plan and were modeled in order to have more information on the behavior of the mango slices during DII. The water diffusion coefficient of mango slices and the solute diffusion coefficient during DII were determined using the modified Crank model. Optimal DII conditions were 6:1 (mL / g) for the immersion ratio, an immersion time of 245 minutes, and a solute concentration of the DII solution of 61.6 °Brix. These operating conditions made it possible to obtain a water loss (PE) of  $47.626 \pm 1.793$  (g/100 g) and a gain in solute (GS) of  $6.67 \pm 1.04$  (g/ 100 g). The modified Page, Weibull and Crank models best describe the kinetics of PE and GS during DII with R<sup>2</sup>s all greater than 0.98 and mean relative errors (MRE) all less than 0.06. The water and solute diffusion coefficients were  $1.4314 \cdot 10^{-09}$  m<sup>2</sup>/s and  $3.2374 \cdot 10^{-09}$  m<sup>2</sup>/s, respectively. The results obtained in this work will be used for the sizing of production equipment.

**Keywords:** Mango, Osmotic dehydration, Optimization, Kinetics, Modeling.

## 1. INTRODUCTION

Le Cameroun, pays d'Afrique Centrale, regorge plusieurs variétés de mangues (*Mangifera indica* L. Moench) dont l'abondante récolte annuelle s'effectue durant une courte période de 4 à 5 mois selon la variété. Ce fruit provient du manguier et comporte 4 parties qui sont le pédoncule, l'exocarpe (la peau), le mésocarpe (riche en fibres, glucides, vitamine C, Beta carotène, en polyphénols et en oligoéléments) et l'endocarpe (le noyau) (Whitmore, 1975 ; Bafode, 1988). Le mésocarpe, partie comestible, est utilisé pour produire des jus, confiture, des poudres de mangue, des mangues séchées et bien d'autres produits dérivés.

Pendant la période de récolte de ce fruit, plus de 50 % des pertes post récoltes sont enregistrées du fait (1) de sa teneur en eau très élevée (80-93 g d'eau/100 g de produit humide) (2) des mauvaises techniques de récolte ; (3) des attaques de parasites et ravageurs ; (4) des difficultés de conservation en l'absence d'infrastructures appropriées et (5) du faible niveau de transformation, par méconnaissance des techniques les mieux indiquées (Temple, 2001 ; Rivier et al., 2010). Pour éviter ces pertes post-récolte et encourager la population à la création et l'entretien des vergers de mangue, plusieurs méthodes de transformations et techniques de conservation des mangues existent pour améliorer leur conservation dans le temps et permettre leur disponibilité dans l'espace.

Le séchage convectif à air chaud est, de toutes les techniques de conservation, la meilleure car va éliminer l'humidité imprégnant le fruit par évaporation jusqu'à atteindre le niveau d'humidité souhaité et non dangereux pour sa conservation pendant une période plus longue (Charreau et Cavaille, 1995). Mais pendant cette opération, les transferts couplés de chaleur et de matière qui s'effectuent vont entraîner des changements (physiques et biochimiques) et des modifications des propriétés organoleptiques (Labuza et Tannenbaum 1972 ; Wang et Brennan, 1995 ; Sharma and Prasad, 2005). En plus ce processus de séchage est consommatrice d'énergie car le séchage des fruits à haute teneur en eau nécessite environ 5000 kJ/kg d'eau évaporée (Mujumdar, 2006). Pour pallier ces différents obstacles, des chercheurs préconisent un enchaînement Déshydratation Imprégnation par Immersion (DII) – séchage convectif à air chaud (Wang et Sastry, 2000 ; Ade-Omowaye et al., 2003 ; Fernandes et al., 2006).

L'opération de DII, qui est simple à mettre en œuvre, consiste à immerger une matière généralement d'origine végétale dans une solution concentrée de soluté (sucre, sel, ...). Pendant ce processus de DII, le liquide (eau + substances solubles) présent dans les matériaux cellulaires (tels que les fruits et légumes) va diffuser dans la solution de DII et simultanément, le soluté présent dans la solution de DII va migrer de la surface du fruit vers l'intérieur (Castello et al., 2009 ; Ade-Omowaye et al., 2003 ; Lenart, 1996 ; Raoult-Wack, 1994).

Les critères de performance qui permettent évaluer l'efficacité de la DII sont la perte d'eau (PE) et le gain en soluté (GS). Pendant cette opération, la sortie d'eau s'accompagne généralement d'une sortie de substances de faible masse moléculaire propres au fruit (les saccharides, les acides organiques, les vitamines, les minéraux et les sels) (Jiokap et al., 2001a). Ce transfert est quantitativement négligeable par rapport aux deux premiers (Castello et al., 2009 ; Ade-Omowaye et al., 2003 ; Albagnac et al., 2002 ; Raoult-Wack, 1994). La DII avant séchage va consister à réduire partiellement et à moindre coût le liquide imprégnant le fruit tout en préservant au maximum ses qualités nutritionnelles et en lui conférant des propriétés sensorielles nouvelles et appréciées.

Malgré les études menées sur la DII couplé au séchage, il est difficile d'établir des conditions optimales de DII qui permettent de mieux préparer le fruit à un séchage postérieur dans l'optique de préserver au maximum ses propriétés nutritionnelles. La PE et le GS dépendent à la fois des conditions opératoires et des propriétés intrinsèques du fruit qui sont très variant d'un fruit à l'autre. Le taux de transfert de matière augmente avec la surface spécifique du produit (Islam et Flink, 1982 ; Lerici et al., 1985) et avec la température (Floury et al., 2008 ; Jiokap et al., 2001b, Jiokap et al., 2001c). Le rapport entre la PE et le GS dépend à la fois de la concentration en soluté et de sa masse moléculaire. En utilisant des solutions hautement concentrées, une perte de poids considérable peut être observée avec un faible gain en soluté (Karel, 1975 ; Hawkes & Flink, 1978 ; Islam et Flink, 1982 ; Ponting et al., 1966). En revanche, à de faibles concentrations en soluté de la solution de DII, le gain de soluté par le fruit est favorisé (Raoult-Wack et al., 1991). De même, l'utilisation de solutés à masse moléculaire élevée favorise la perte d'eau au détriment du gain solide. L'influence du ratio masse du fruit/volume de solution de DII sur la PE et le GS est peu connu à nos jours

alors que ce facteur pourrait jouer un rôle très important dans le mécanisme de transfert de matière. En plus, ce facteur est vraiment essentiel dans la minimisation des coûts de traitement et aussi essentiel dans la conception et dimensionnement des équipement de DII.

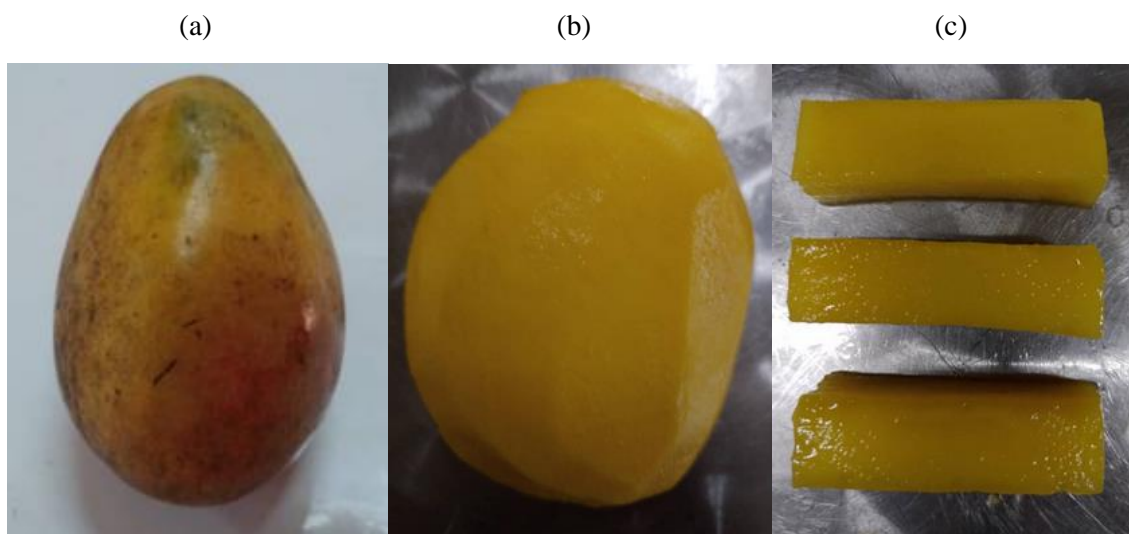
Selon les variables du procédé, la quantité de soluté diffusant est généralement d'environ 5 à 10 % de la masse initial du produit. Cette quantité modifie la composition et le goût final du produit (Ponting, 1973), et contribue à bloquer les couches superficielles du fruit, ce qui confère une résistance supplémentaire aux transferts de matière pendant l'opération de DII (Araujo et Murr, 2002) et cette résistance peut s'étendre jusqu'au séchage postérieur. Dans de telles situations, il devient important de déterminer les conditions optimales de prétraitement des tranches de mangues qui entraîneraient une perte d'eau maximale et un gain en soluté minimal lors de la DII. De tous les outils d'optimisation, la méthodologie de surface de réponse (RSM) reste un outil simple d'utilisation et est important dans l'amélioration des opérations unitaires. C'est une collection de stratégies expérimentales, de méthodes mathématiques et statistiques permettant de déterminer la relation entre la réponse et les paramètres et de choisir la meilleure des combinaisons des niveaux des paramètres qui optimise une opération unitaire (Box & Draper, 1987 ; Khuri et Cornell, 1996 ; Goupy, 2001).

Il s'agira donc pour cette étude de déterminer les effets du ratio solution-masse fruit, du temps de prétraitement et de la concentration en saccharose sur les phénomènes de transfert de matière lors de la DII des tranches de mangues, de trouver les conditions optimales de traitement qui maximisent la perte d'eau et minimisent le gain en solutés et de déterminer les meilleurs modèles mathématiques qui décrivent mieux le processus de déshydratation osmotique sur les conditions optimales.

## 2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

### 2.1. Préparation de la matière première

La variété de mangue utilisée pour cette étude est la mangue café (Figure 1a). Cette variété est celle la plus produite, commercialisée et consommée dans la région de l'Adamaoua-Cameroun. Pour mener à bien nos recherches, les mangues ont été cueillies sur un manguier de la ville de Ngaoundéré à un même niveau de maturité et conduits au laboratoire pour conservation au réfrigérateur à 4 °C avant les expériences. Avant expérimentation, les mangues sorties du réfrigérateur puis laissées au repos à température ambiante pendant quelques minutes, ont été lavées, rincées, épluchées (Figure 1b) et la partie charnue (mésocarpe) a été découpée en tranches de dimension 40 x 10 x 10 mm<sup>3</sup> (Figure 1c).



**Figure 1 :** (a) : Mangue, variété café de l'Adamaoua ; (b) : Mangue épluchée ; (c) : Tranches de mangues de dimension 40x10x10 mm<sup>3</sup>.

## 2.2. Analyses physico-chimiques

Après préparation, les mangues ont été caractérisées. Toutes les expériences ont été conduites 3 fois.

La teneur en eau base humide (g/g) a été effectuée en évaluant la perte en masse des échantillons après étuvage à  $105 \pm 2$  °C pendant 24 heures dans une étuve (Memmert GmbH+Co.KG D-91136 Schwabach FRG, made in Germany) (AFNOR, 1982). La teneur en cendre (g/100 ms) a été effectué en incinérant un échantillon de masse connu, préalablement passé à l'étuve 105 °C pendant 24 heures, dans un four à moufle à 550 °C (AOAC, 1990). Les fibres brutes ou fibres insolubles regroupent la cellulose, quelques hémicelluloses, la lignine. La teneur en fibres brutes (g/100 g ms) des échantillons a été déterminée par la méthode de Weende (Wolff, 1968).

La détermination de la teneur en acidité titrable (még.g/100 g produit frais) a été effectuée par la méthode AFNOR (1982). Cette méthode est basée sur un dosage volumétrique des acides organiques titrables présents dans un échantillon avec la soude (NaOH) 0,1 N en présence de la phénophtaléine. Les sucres solubles en degré Brix (°B) des échantillons de mangue ont été mesurés avec le réfractomètre numérique Brix HI 96801 (HANNA Instruments Inc, 0-85 °Brix, Woonsocket-RI-USA, Roumanie). Pour les mesures, quelques gouttes de jus de mangue, obtenues en broyant et pressant la mangue à l'aide d'une mousseline, ont été déposées sur la surface de lecture du réfractomètre.

Les composés phénoliques totaux (még.m /100 g ms), en équivalent d'acide gallique (GAE), ont été déterminés selon Singleton et Rossi (1965). Des échantillons de masse connue ont été mélangés avec 25 ml d'éthanol à 70 %, puis agités dans un bain-marie pendant 1 h, et enfin centrifugés (10 000 x g pendant 10 min). Les surnageants ont été collectés et les résidus ont été réextraits deux fois en utilisant 10 ml d'éthanol à 70 %, puis centrifugés (10 000 x g pendant 5 min).

Pour déterminer la teneur en acide ascorbique (mg/100 g) (AOAC, 1990), la méthode volumétrique au 2, 6 dichloroindophénol-sel de sodium a été utilisée. Pour les caroténoïdes totaux ( $\mu\text{g}/100$  g ms), les échantillons ont été extraits avec une solution hexane:acétone (7:3) et après transfert de phase, l'absorbance a été lue à 450 nm à l'aide d'un spectrophotomètre (JENWAY 7310 spectrophotometer, Designed and Manufactured in the UK by bibby scientific Ltd) selon Jaeger de Carvalho et al., 2012.

## 2.3. Déshydratation Imprégnation par Immersion

Les solutions de DII ont été préparées en utilisant du saccharose (de qualité alimentaire acheté au marché local de Ngaoundéré) et une quantité appropriée d'eau osmosée. Les tranches de mangues obtenues après la découpe, de dimension  $40 \times 10 \times 10$  mm<sup>3</sup>, ont été immergées dans une solution de DII préalablement préparées à des concentrations comprises entre 45-65 °Brix. Pour chaque expérience, la température a été maintenue constante à 35 °C. A la fin de chaque expérience, le degré Brix de la solution de DII a été mesuré afin de déterminer la réduction du degré Brix (RDB) selon l'équation 1 :

$$\text{RDB} = \frac{\text{DB}_0 - \text{DB}_t}{\text{DB}_0} \quad (1)$$

Avec  $\text{DB}_0$  : degré Brix avant DII et  $\text{DB}_t$  : degré Brix après DII.

L'opération de DII a été effectuée en discontinu, dans des bocaux munis d'un couvercle, disposés dans un incubateur (INCUCCELL 111, Medcenter Einrichtungen GmbH D-82166 Gräfelfing/Germany, made by MMM-Group). L'agitation s'est faite manuellement toutes les 15 minutes, pour améliorer le transfert de matière et empêcher la formation d'un film de solution diluée autour des échantillons. A chaque temps d'expérience, les tranches de mangue ont été retirées du milieu osmotique, égouttées, puis rincées avec très peu d'eau, puis égouttées une seconde fois et pesées. Par la suite, la teneur en eau de la tranche de mangue traitée par DII a été déterminée pour calculer la perte d'eau et le gain en soluté. L'évaluation des transferts de masse entre la solution et les tranches de mangues au cours de la DII a été effectuée en utilisant des paramètres tels que la perte d'eau (PE) et le gain en soluté (GS). Ces paramètres ont été calculés selon les équations 1 et 2 :

$$PE = \frac{(M_0 \times X_{w0}) - (M_t \times X_{wt})}{M_0} \tag{2}$$

$$GS = \frac{(M_t \times X_{st}) - (M_0 \times X_{s0})}{M_0} \tag{3}$$

Avec  $M_0$  : masse échantillon à l’instant  $t=0$  ;  $M_t$  : masse échantillon à l’instant  $t$  ;  $X_{w0}$  : teneur en eau base humide à l’instant  $t=0$  ;  $X_{wt}$  : teneur en eau base humide à l’instant  $t$  ;  $X_{s0}$  : teneur en soluté à l’instant  $t=0$  ;  $X_{st}$  : teneur en soluté à l’instant  $t$

## 2.4. Conception expérimentale

La méthodologie de surface de réponse a été utilisée pour évaluer les principaux effets des facteurs sur la perte d’eau (PE) et le gain en soluté (GS) et la réduction du degré Brix de la solution de DII (RDB), lors de la déshydratation Imprégnation par Immersion des tranches de mangues. La ratio volume-masse ( $x_1$ ), la durée du traitement ( $x_2$ ) et le degré Brix ( $x_3$ ) ont été sélectionnées comme variables indépendantes à l’aide d’études bibliographiques et d’expériences préliminaires. Le Tableau 1 présente les valeurs non codées de différents facteurs sélectionnées de la bibliographique.

**Tableau 1 :** Valeurs codées et non codées des variables et leurs niveaux

Facteurs	Niveau bas	Niveau 0	Niveau haut
Ratio V/m ( $x_1$ )	6/1 mL/g	9,5/1 mL/g	13/1 mL/g
Temps ( $x_2$ )	2,268 h	4 h	5,732 h
Degré Brix ( $x_3$ )	46,8 °Brix	55 °Brix	63,2 °Brix

Des trois plans d’optimisation que propose la méthodologie de surface de réponse, le plan de Doehlert a été utilisé pour concevoir les données expérimentales car permet d’obtenir un modèle de second degré avec moins d’essai. En plus, Ce plan a cet avantage d’avoir des niveaux différents d’un facteur à un autre. Ceci nous permet de donner à un facteur plus d’importance qu’un autre en fonction de l’information que l’on veut faire ressortir. Avec ces trois facteurs, le plan de Doehlert nous a donné 15 expériences. Chaque expérience du plan a été répétée trois fois. Le Tableau 2 présente la matrice d’expérience du plan de Doehlert.

**Tableau 2 :** Matrice d’expérience et matrice d’expérimentation du plan de Doehlert.

N°	Valeurs codées			Valeurs réelles			Réponses		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	PE	GS	RDB
1	0	0	0	9,5	4	55			
2	1	0	0	13	4	55			
3	0,5	0,866	0	11,25	5,732	55			
4	-0,5	0,866	0	7,75	5,732	55			
5	-1	0	0	6	4	55			
6	-0,5	-0,866	0	7,75	2,268	55			
7	0,5	-0,866	0	11,25	2,268	55			
8	0	0	0	9,5	4	55			
9	-0,5	0,289	0,816	7,75	4,578	63,16			
10	0,5	-0,289	-0,816	11,25	3,422	46,84			
11	-0,5	-0,289	-0,816	7,75	3,422	46,8			
12	0,5	0,289	0,816	11,25	4,578	63,2			
13	0	-0,577	0,816	9,5	2,846	63,2			
14	0	0,577	-0,816	9,5	5,154	46,8			
15	0	0	0	9,5	4	55			

Le modèle postulé à priori pour notre expérience est l'équation polynomiale du second ordre donnée par l'équation 4 :

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{j=2}^3 \sum_{i=1}^{j-1} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \tag{4}$$

où,  $X_{i,j}$  : variables de prédiction codées appelées facteurs,  $\beta_{0,i,ii,ij}$  : Coefficients de régression et  $\epsilon$  : Erreur totale qui est la différence entre les valeurs observées et les valeurs estimées de la réponse.

**2.5. Analyses statistique et validation des modèles.**

Les modèles obtenus par analyse de régression linéaire multiple ont été évalués en mesurant les paramètres statistiques présentés par les équations 5, 6, 7, 8 et 9 (Joglekar et May, 1987 ; Bas et Boyac, 2007 ; Dalgaard and Jorgensen, 1998). Une fois les modèles validés, les termes significatifs du modèle ont été déterminés par analyse de variance (ANOVA) pour chaque réponse. La significativité a été évalué au seuil de 5 %.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{i,exp} - Y_{i,calc})^2}{\sum_{i=1}^N (Y_{i,exp} - \bar{Y}_{i,exp})^2} \tag{5}$$

$$Rsqa_j = 1 - \frac{(1-Rsq)*n-1}{n-p} \tag{6}$$

$$AADM = \frac{\left[ \sum_i^N \left( \frac{|Y_{i,exp} - Y_{i,calc}|}{Y_{i,exp}} \right) \right]}{N} \tag{7}$$

$$B_f = 10^{\frac{1}{N} \sum_i^N \log \left( \frac{Y_{i,calc}}{Y_{i,exp}} \right)} \tag{8}$$

$$A_f = 10^{\frac{1}{N} \sum_i^N \left| \log \left( \frac{Y_{i,calc}}{Y_{i,exp}} \right) \right|} \tag{9}$$

Avec  $R^2$  : le coefficient de détermination ( $R^2$ ) ;  $R^2_{adj}$  : le coefficient de détermination ajusté ; AADM : Analyse absolue de déviation de moyenne ;  $B_f$  : Facteurs de Biais ;  $A_f$  : Facteurs d'Exactitudes.  $Y_{i,exp}$  : réponse expérimentale ;  $Y_{i,calc}$  : réponse prédite ;  $N$  : nombre d'observation ;  $p$  : nombre de constante.

Pour valider ces modèles, nous nous sommes référés aux plages de validations que propose certains auteurs (Tableau 3).

**Tableau 3 :** Plage acceptable des indicateurs de validation de modèle

Model validation indicators	Standard values	Acceptable range	Références
$R^2$ and $R^2_{adj}$	1	> 80 %	Joglekar et May, 1987
AADM	0	[0 - 0,3]	Bas and Boyac, 2007
$B_f$ and $A_f$	1	[0,75 - 1,25]	Dalgaard and Jorgensen, 1998

**2.6. Optimisation par la fonction de désirabilité.**

Pour cette étude, l'utilisation du logiciel Statgraphics Centurion 18 (Statgraphics® Technologies, Inc.) a permis de ressortir les courbes d'interaction entre les facteurs pour mieux ressortir leurs effets sur les différentes réponses.

La maximisation et la minimisation des polynômes ainsi ajustés ont été effectuées par la méthode de la fonction de désirabilité se trouvant dans le logiciel Minitab 18 (2017 Minitab®, Inc. All rights reserved). L'approche de la fonction de désirabilité implique la transformation de chaque variable de réponse estimée  $Y_i$  en une valeur de désirabilité  $d_i$ , où  $0 \leq d_i \leq 1$ . La valeur de  $d_i$  augmente à mesure que la désirabilité de la réponse correspondante augmente. Sur l'échelle de la désirabilité individuelle,  $d_i = 0$  est appliqué à une réponse indésirable, et  $d_i = 1$ , pour une réponse souhaitée (Derringer et Suich 1980). L'approche de la fonction de désirabilité est très répandue pour traiter

l'optimisation des problèmes multi-réponses. Les avantages de l'utilisation des fonctions de désirabilité sont : (1) les réponses qui ont une échelle différente peuvent être comparées, (2) la transformation de différentes réponses à une mesure est simple et rapide, (3) des réponses qualitatives et quantitatives peuvent être utilisées (Derringer et Suich, 1980 ; Harrington, 1965).

Pour cette étude, les fonctions de désirabilité ont été développées pour les critères de maximisation de la perte d'eau et de minimisation du gain en soluté. Après détermination des conditions opératoires optimales, obtenues grâce à la fonction de désirabilité, de nouveaux essais ont été effectués pour valider les modèles.

### 2.7. Modélisation des courbes de DII

Les courbes de PE et de GS en fonction du temps, obtenues en prétraitant des tranches de mangues selon les conditions optimales de DII trouvées, ont été modélisées par 8 modèles de DII couramment rencontrés dans la bibliographie et présentés dans le Tableau 4.

**Tableau 4 :** Modèle prédictif de transfert de matière pendant la DII

No	Nom	Modèle	Reference
1	Azuara	$PE \text{ ou } GS = \frac{S \times t \times WL_{\infty}}{1 + S \times t}$	Azuara et al. (1992)
2	Crank	$\frac{PE}{PE_{\infty}} \text{ ou } \frac{GS}{GS_{\infty}} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \times \exp(-k_{PE \text{ ou } GS} \times t)$	Crank (1975)
3	Crank modifié	$\frac{PE}{PE_{\infty}} \text{ ou } \frac{GS}{GS_{\infty}} = 1 - C_z \times \exp(-k_{PE \text{ ou } GS} \times t)$	Présent travail.
4	Magee	$PE \text{ ou } GS = A + k \times t^{0,5}$	Magee et al. (1983)
5	Page	$\frac{PE}{PE_{\infty}} \text{ ou } \frac{GS}{GS_{\infty}} = 1 - \exp(-A_w \times t^{\beta_w})$	Page (1949)
6	Peleg	$PE \text{ ou } GS = \frac{t}{k_1 + k_2 \times t}$	Peleg (1988)
7	Penetration	$PE \text{ ou } GS = k \times t^{0,5}$	Hawkes and Flink (1978)
8	Weibull	$\frac{PE}{PE_{\infty}} \text{ ou } \frac{GS}{GS_{\infty}} = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{\alpha_w}\right)^{\beta_w}\right)$	Cunha et al. (2001)

La validité des modèles a été évaluée par 5 critères : le coefficient de détermination (équation 5), le R<sup>2</sup> ajusté (équation 6), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) donnée par l'équation 10 et l'erreur relative moyenne (MRE) donnée par l'équation 11.

$$RMSE = \left( \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{calc,i} - Y_{exp,i})^2}{N} \right)^{1/2} \tag{10}$$

$$MRE = \frac{1}{N} \frac{\sum_i |Y_{cal} - Y_{exp}|}{Y_{exp}} \tag{11}$$

Où Ycal et Yexp sont les valeurs respectivement calculées et expérimentales et N le nombre d'observation.

Pour classer les modèles, nous avons utilisé la somme des minimums qui représente la somme des minimums de tous les critères de validations utilisés. La somme des minimums a été évaluée selon l'équation 12 :

$$\text{Somme des minimums} = (1 - R_{sq}) + (1 - R_{sadj}) + RMSE + MRE \tag{12}$$

Le choix du meilleur modèle correspond à la somme des minimums dont la valeur est la plus faible.

Le coefficient de diffusion de l'eau des tranches de mangues et le coefficient de diffusion du soluté pendant la DII ont été déterminés en utilisant les formules suivantes (Alakali et al., 2006 et Assis et al., 2016) :

$$Deff_{PE} = \frac{4 \times L^2 \times k_{PE}}{\pi^2} \tag{13}$$

$$Deff_{GS} = \frac{4 \times L^2 \times k_{GS}}{\pi^2} \tag{14}$$

Avec  $Deff_{PE}$  et  $Deff_{GS}$  respectivement le coefficient de diffusion de l'eau et le coefficient de diffusion du soluté,  $k_{PE}$  et  $k_{GS}$  les paramètres du modèle modifié de Crank,  $L$  la longueur caractéristique de la tranche de mangue de dimension  $40 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ .

### 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

#### 3.1. Caractérisation des mangues

Le Tableau 5 présente les résultats de l'analyse des mangues. Il ressort que la teneur en eau, en vitamine C, en cendres et le degré Brix sont comparables à ceux obtenus par Jiokap Nono et al. (2001c) et par Sawadogo-Lingani et Traore (2001). Il ressort également du Tableau 5 que la teneur en fibres, en acidité, en polyphénols et en  $\beta$ -caroténoïdes ont en moyenne des valeurs proches des travaux de Sawadogo-Lingani et Traore (2001) et de Sogi et al. (2014).

**Tableau 5 :** Composition physico-chimique du mésocarpe de la mangue.

Constituants	Valeurs
Eau (g/100 g)	84,42 ± 1,18
Cendres (g/100 g MS)	2,117 ± 0,336
Fibres totales (g/100 g MS)	0,0439 ± 0,0021
Acidité (méqg/100 g MS)	6,171 ± 1,411
Sucres solubles (°Brix)	11,3 ± 1,317
Polyphénols (méq.mg/100 g MS)	2354,084 ± 69,846
Vitamine C (mg/100 g MS)	50,997 ± 9,183
Caroténoïdes (µg/100 g MS)	822,440 ± 259,536

Toutefois, de légères variations sont observées d'un auteur à un autre sur ces différentes compositions, et pourraient être dues : (i) aux différentes variétés de mangues utilisée pour les études ; (ii) à l'espace géographique où ont été cultivées ces mangues (iii) et aussi à la période de récolte, car d'une variété à l'autre et d'une période à une autre, la composition physico-chimique de la mangue peut varier significativement.

De manière générale nous pouvons dire que la mangue à un potentiel nutritionnel certain et d'une variété à l'autre la mangue contient des nutriments pouvant contribuer à maintenir le bon fonctionnement de l'organisme.

#### 3.2. Modélisation et validation des modèles

##### 3.2.1. Modélisation

Un plan de Doehlert de 15 expériences a été réalisé afin d'évaluer l'influence du ratio  $V/m$ , du temps et du °Brix sur le gain en soluté (GS), la perte d'eau (PE) et la réduction du degré Brix. Les matrices d'expérience et d'expérimentation, ainsi que les réponses expérimentales et calculées pour chaque expérience sont présentées dans le Tableau 6.



**Tableau 6 :** Matrice d’expérience et matrice d’expérimentation du plan de Doehlert.

N°	Valeurs codées			Valeurs réelles			Réponses					
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	PE (g/100 g)		GS (g/100 g)		RDB (g/100 g)	
							Exp	Cal	Exp	Cal	Exp	Cal
1	0	0	0	9,5	4	55	42,633	42,054	8,32	8,227	3,697	3,556
2	1	0	0	13	4	55	44,707	44,306	7,642	7,695	2,848	2,856
3	0,5	0,866	0	11,25	5,732	55	47,869	47,563	9,299	9,361	3,758	3,752
4	-0,5	0,866	0	7,75	5,732	55	47,29	47,411	8,381	8,889	5,333	5,259
5	-1	0	0	6	4	55	41,489	41,890	6,859	6,806	5,818	5,811
6	-0,5	-0,866	0	7,75	2,268	55	30,583	30,888	6,754	6,691	3,576	3,582
7	0,5	-0,866	0	11,25	2,268	55	33,273	33,152	7,614	7,107	2,061	2,134
8	0	0	0	9,5	4	55	41,455	42,054	7,706	8,227	3,697	3,556
9	-0,5	0,289	0,816	7,75	4,578	63,16	54,224	53,703	7,661	7,206	5,742	5,823
10	0,5	-0,289	-0,816	11,25	3,422	46,84	37,521	38,042	6,991	7,446	2,861	2,78
11	-0,5	-0,289	-0,816	7,75	3,422	46,8	34,557	33,850	8,584	8,699	3,917	3,919
12	0,5	0,289	0,816	11,25	4,578	63,2	51,221	51,927	9,463	9,347	4,008	4,007
13	0	-0,577	0,816	9,5	2,846	63,2	40,794	40,609	4,641	5,211	3,639	3,559
14	0	0,577	-0,816	9,5	5,154	46,8	39,022	39,207	7,802	7,232	3,561	3,641
15	0	0	0	9,5	4	55	42,074	42,054	8,656	8,227	3,273	3,556

Une analyse par régression linéaire multiple des données expérimentales a permis d’établir des modèles polynomiaux du second ordre pour prédire le GS, la PE et RDB. Ces modèles sont les suivants (équations 15, 16 et 17) :

⊙ Modèle du Gain en Soluté (GS) :

$$Y_{GS} = 8,227 + 0,444x_1 + 1,484x_2 - 0,404x_3 - 0,977x_1^2 + 0,052x_2^2 - 1,237x_3^2 + 0,038x_1x_2 + 2,53x_1x_3 + 4,42x_2x_3 \tag{15}$$

⊙ Modèle de la perte d’eau (PE) :

$$Y_{PE} = 42,054 + 1,208x_1 + 10,312x_2 + 8,791x_3 + 1,044x_1^2 - 4,554x_2^2 + 2,773x_3^2 - 1,41x_1x_2 - 3,95x_1x_3 + 6,730x_2x_3 \tag{16}$$

⊙ Modèle de la réduction du degré Brix (RDB) :

$$Y_{RDB} = 3,556 - 1,477x_1 + 1,098x_2 + 0,763x_3 + 0,778x_1^2 - 0,121x_2^2 + 0,642x_3^2 - 0,040x_1x_2 - 0,493x_1x_3 + 0,630x_2x_3 \tag{17}$$

Avec : Y<sub>GS</sub>, représente le modèle mathématique pour le GS, Y<sub>PE</sub>, représente le modèle mathématique pour la PE, Y<sub>RDB</sub>, représente le modèle mathématique pour la RDB ; x<sub>1</sub>, le ratio V/m ; x<sub>2</sub>, le temps d’immersion et x<sub>3</sub>, le degré Brix.

### 3.2.2. Validation de modèles

Le Tableau 7 présente les valeurs des coefficients des différents facteurs, leur p-value ainsi que les valeurs des différents critères de validations des modèles obtenues.

**Tableau 7 :** Tableau ANOVA des modèles polynomiaux de prédiction de la perte d'eau, du gain en solutés des mangues et de réduction du degré Brix de la solution.

Source	DL	PE			GS			RDB		
		Coef	SCar	Valeur P	Coef	SCar	Valeur P	coef	SCar	Valeur P
<b>Modèle</b>	<b>9</b>	<b>42,054</b>	<b>594,533</b>	<b>0,000</b>	<b>8,227</b>	<b>17,5597</b>	<b>0,052</b>	<b>3,556</b>	<b>15,3015</b>	<b>0,000</b>
<b>Linéaires</b>	<b>3</b>	<b>/</b>	<b>530,603</b>	<b>0,000</b>	<b>/</b>	<b>7,8285</b>	<b>0,038</b>	<b>/</b>	<b>13,9024</b>	<b>0,000</b>
Ratio	1	1,208	5,839	0,024	0,444	0,7888	0,227	-1,477	8,7327	0,000
tps	1	10,312	318,961	0,000	1,484	6,6064	0,010	1,098	3,6190	0,000
°B	1	8,791	205,593	0,000	-0,404	0,4347	0,354	0,763	1,5488	0,001
<b>Carré</b>	<b>3</b>	<b>/</b>	<b>27,222</b>	<b>0,005</b>	<b>/</b>	<b>1,7665</b>	<b>0,342</b>	<b>/</b>	<b>0,9061</b>	<b>0,016</b>
T*T	1	1,044	1,308	0,190	-0,977	1,1451	0,158	0,778	0,7259	0,005
tps*tps	1	-4,554	13,995	0,004	0,052	0,0018	0,950	-0,121	0,0099	0,598
Ratio*Ratio	1	2,773	4,536	0,037	-1,237	0,9021	0,201	0,642	0,2432	0,039
<b>Interaction à 2 facteurs</b>	<b>3</b>	<b>/</b>	<b>23,565</b>	<b>0,007</b>	<b>/</b>	<b>8,7268</b>	<b>0,031</b>	<b>/</b>	<b>0,2344</b>	<b>0,175</b>
Ratio*tps	1	-1,408	1,115	0,220	0,038	0,0008	0,967	-0,040	0,0009	0,871
Ratio*°B	1	-3,951	6,228	0,021	2,535	2,5633	0,056	-0,493	0,0970	0,139
Tps*°B	1	6,728	13,550	0,005	4,419*	5,8451	0,013	0,630	0,1189	0,109
<b>Erreur</b>	<b>5</b>	<b>/</b>	<b>2,842</b>	<b>/</b>	<b>/</b>	<b>2,0818</b>	<b>/</b>	<b>/</b>	<b>0,1570</b>	<b>/</b>
Lack of fit	3	/	2,147	0,343	/	1,6179	0,315	/	0,0370	0,886
Erreur pure	2	/	0,695	/	/	0,4640	/	/	0,1200	/
<b>Total</b>	<b>14</b>	<b>/</b>	<b>597,375</b>	<b>/</b>	<b>/</b>	<b>19,6415</b>	<b>/</b>	<b>/</b>	<b>15,4584</b>	<b>/</b>
R2	/	0,9952			0,8940			0,9898		
R2 ajusté	/	0,9867			0,7032			0,9716		
AADM	/	0,0091			0,0421			0,0204		
Bf	/	1,0001			1,0021			1,0008		
Af	/	1,0091			1,0427			1,0205		

A la lumière du Tableau 3 qui donne les plages de validation des modèles, nous concluons que le modèle  $Y_{PE}$  et  $Y_{RDB}$  sont valides car ils respectent les plages de validation. Le modèle  $Y_{GS}$  quant à lui ne respecte pas la condition concernant le  $R^2$  ajusté mais respectent les autres conditions de validation. De ce fait, nous pouvons dire que le modèle  $Y_{GS}$  est valide.

### 3.2.3. Contribution des facteurs des modèles

Une analyse de la variance réalisée à partir des réponses obtenues nous permet de déterminer les effets significatifs des différents facteurs. Le Tableau 7 présente tous les facteurs et leurs interactions, leur coefficient respectif ainsi que leur paramètre de significativité, au seuil de 5 %. Du Tableau 7, nous pouvons constater que l'interaction temps-Brix, l'interaction ratio-Brix et l'effet direct du temps contribuent respectivement à 38,131 %, 21,872 % et 12,805 % à augmenter le GS alors que le °Brix, l'effet quadratique du ratio et du Brix contribuent respectivement à limiter le GS de 3,488 %, 8,429 % et 10,672 %. Nous constatons en outre que l'effet direct du temps, du °Brix et leur interaction contribuent respectivement à 25,294 %, 21,563 % et 16,503 % à augmenter la PE alors que l'effet quadratique du temps, de l'interaction ratio-temps et ratio-Brix contribuent respectivement à réduire la PE de 2,561 %, 6,802 % et 3,454 %. Enfin, l'effet quadratique du ratio, l'effet direct du temps, du °Brix et de leur interaction contribuent respectivement à 12,868 %, 18,173 %, 12,624 % et 10,430 % à augmenter la RDB alors que l'effet direct du ratio et de son interaction avec le °Brix contribuent respectivement à freiner la RDB de 24,446 % et 8,160 %.

## 3.3. Effet des facteurs et de leurs interactions sur les réponses

### 3.3.1. Interaction ratio-Brix sur la perte d'eau (PE)

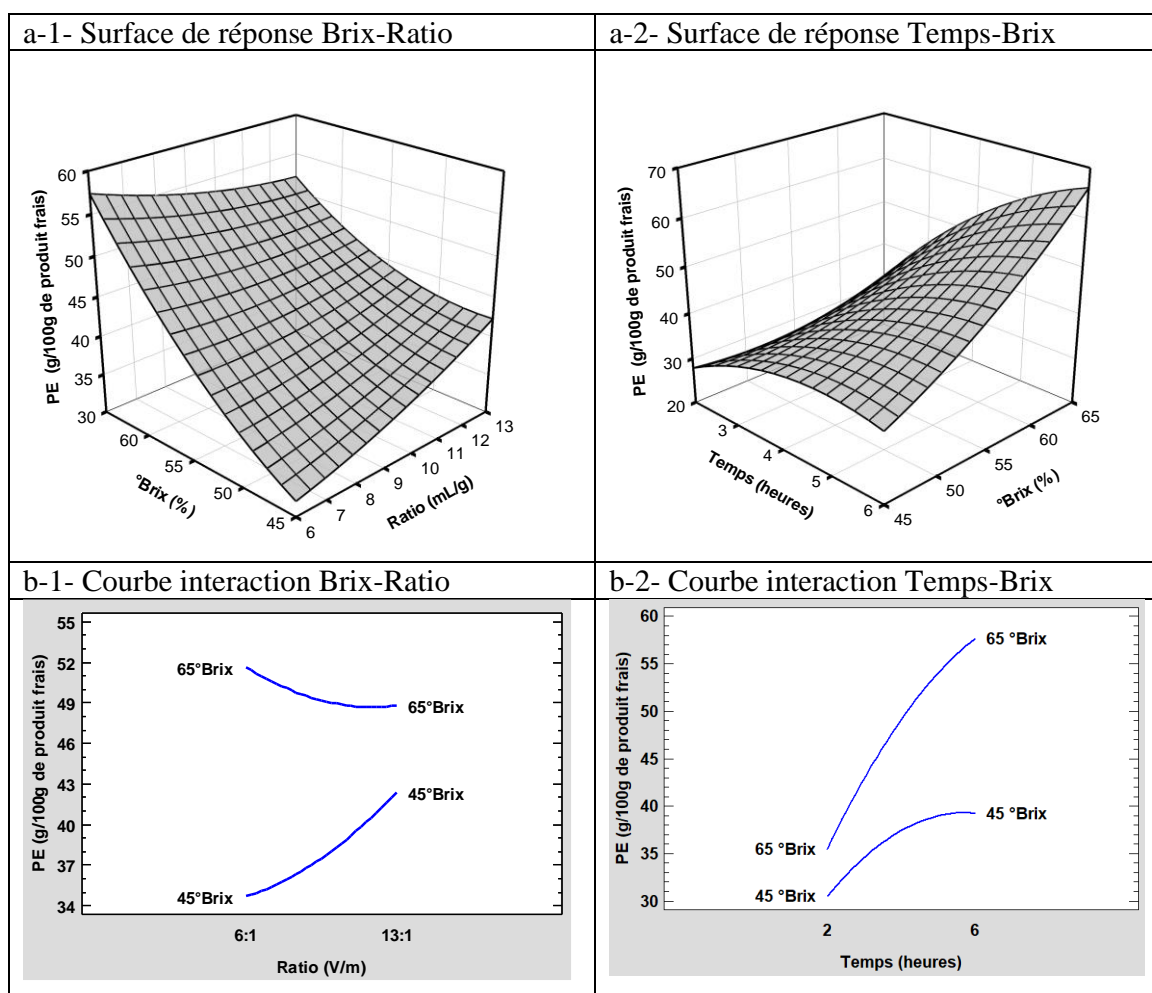
Les Figures 2a1 et 2b1 montrent que, lorsque le ratio est à son niveau bas (6:1) ou à son niveau haut (13:1), la PE augmente lorsque le °Brix de la solution de DII augmente. Mais nous constatons de ces deux évolutions que, la PE est plus prononcée lorsque le ratio est à son niveau bas. En outre, nous constatons que, lorsque le °Brix est à son niveau bas, la PE augmente rapidement avec le ratio. Mais lorsque le °Brix est à son niveau haut, la PE diminue faiblement avec l'augmentation du ratio et tant à se stabilisé pour les ratios grands. Nous pouvons dire que la PE est

plus prononcée pour les ratios V/m bas à des degré Brix élevé. Ce phénomène pourrait s’expliquer par le fait que, pendant le processus de DII, à des ratios bas, le degré Brix de la solution diminue rapidement comparé à des processus de DII avec des ratios élevés où le degré Brix e la solution ne diminue pas vite. Cette faible diminution du degré Brix de la solution pendant la DII va entrainer une augmentation de l’imprégnation du soluté sur les tranches de mangues qui à son tour va saturer les pores de la matrice végétale limitant à un moment donné la PE. Alors qu’a des ratios bas la PE dans ma matrice végétale se fait sans obstacle d’où une PE élevée à des ratios bas.

Ce résultat est contraire aux travaux de Manivannan et Rajasimman (2009), où la PE est élevée pour les ratios élevés (1/15). Cette différence peut être dû au choix des plages expérimentales et du plan de surface de réponse utilisé.

### 3.3.2. Interaction temps-Brix sur la PE

Les Figures 2a2 et 2b2 montrent que lorsque le temps est à son niveau bas (2 heures) ou à son niveau haut (4 heures), la PE augmente lorsque le °Brix de la solution de DII augmente. Mais de ces deux évolutions nous constatons que la PE est plus prononcée lorsque le temps est à son niveau haut (4 heures).



**Figure 2 :** Surfaces de réponse (a) et courbe d’interaction (b) du Ratio-°Brix (temps de DII au centre : 4 h) et du temps-°Brix (ratio de DII au centre : 9,5 :1) sur la perte d’eau (PE).

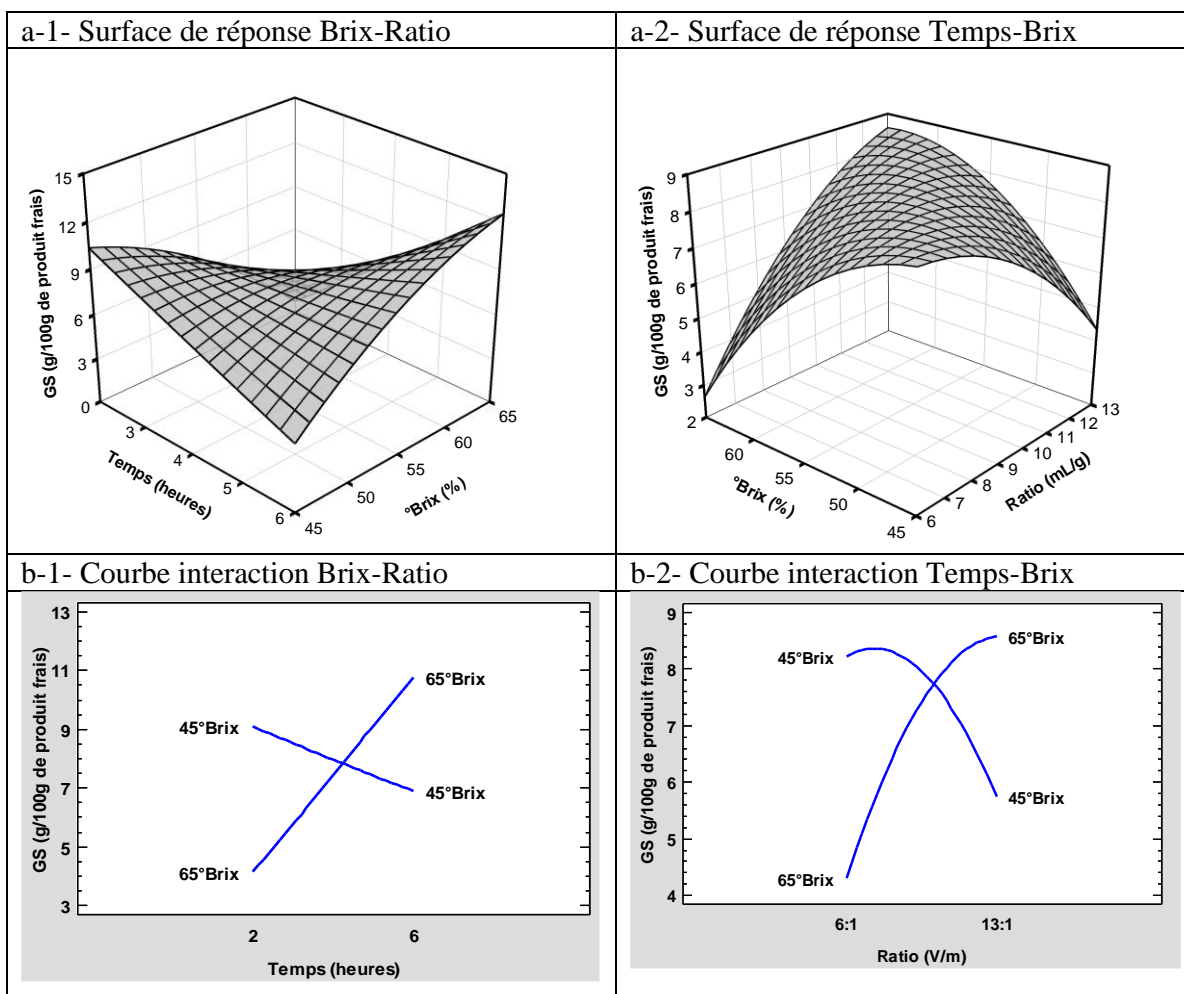
En outre, nous constatons que, lorsque le °Brix est à son niveau bas (45 °Brix), la PE augmente faiblement avec le temps de traitement et tant à se stabiliser pour les temps de traitement long. Mais lorsque le °Brix est à son niveau haut (65 °Brix), la PE augmente fortement avec le temps de traitement. Nous constatons de ces deux évolutions que la PE est plus prononcée lorsque le °Brix est à son niveau haut. Nous pouvons dire que la PE est plus prononcée pour

les temps de traitement élevés à des degré Brix élevé. Plusieurs études ont fait mention de cette évolution pendant la DII (Jiokap et al., 2001a ; Jiokap et al., 2001b ; Madamba et Lopez, 2002 ; Eren et Kaymak-Ertekin, 2006 ; Cao et al., 2010). Ce résultat pourrait s’expliquer par le fait que pendant le processus de DII, la différence de potentiel chimique à travers la membrane semi-perméable des tranches de mangue et la solution de DII entraine une migration des molécules d’eau des mangues vers la solution de DII. Ce qui va donc entrainer la réduction du degré Brix de la solution de DII et une perte d’eau dans les tranches de mangue (Raoult-Wack, 1994).

### 3.3.3. Interaction ratio-Brix sur le GS

Les Figures 3 a1 et 3b1 montrent que lorsque le ratio est à son niveau bas (6:1), le GS diminue avec l’augmentation du °Brix de la solution de DII et lorsque le ratio est à son niveau haut (13:1), le GS augmente avec le °Brix de la solution de DII. En outre, nous constatons que, lorsque le °Brix est à son niveau bas, le GS diminue lorsque le ratio augmente. Mais lorsque le °Brix est à son niveau haut, le GS augmente lorsque le ratio augmente.

Nous pouvons dire que le GS est faible pour les ratios V/m bas et à des degré Brix élevé. Ce résultat pourrait s’expliquer par le fait que pendant le processus de DII, à des ratios bas, le degré Brix de la solution diminue rapidement comparé à des processus de DII avec des ratios élevés où le degré Brix de la solution ne diminue pas vite. Cette diminution rapide du degré Brix de la solution va limiter l’imprégnation du soluté sur les tranches de mangues. Ce résultat est contraire à ceux de Manivannan et Rajasimman, 2009, où le GS est élevé pour les ratios élevés (1/15). Cette différence peut être due au choix des plages expérimentales et du plan de surface de réponse utilisé.



**Figure 3** : Surfaces de réponse (a) et courbe d’interaction (b) du Ratio -°Brix et du temps -°Brix sur le GS

### 3.3.4. Interaction temps-Brix sur le GS

Les Figures 3a2 et 3b2 montrent que lorsque le temps est à son niveau bas (2 heures), le GS diminue avec l'augmentation du °Brix de la solution de DII et lorsque le temps est à son niveau haut (6 heures), le GS augmente lorsque le °Brix de la solution de DII augmente. En outre, nous constatons que, lorsque le °Brix est à son niveau bas (45 °Brix), le GS diminue avec le temps d'immersion des tranches de mangue. Mais lorsque le °Brix est à son niveau haut (65 °Brix), le GS augmente avec le temps d'immersion des tranches de mangue. Ceci dit, le GS est faible lorsque le temps de traitement est court et est élevé lorsque le temps de traitement est long. Ceci parce que plus la tranche de mangue est immergée dans une solution fortement concentrée en sucre plus les molécules de sucre vont s'infiltrer dans la tranche tout en passant par ses pores.

Nous pouvons dire que le GS est prononcé pour les temps de traitement élevés à des degrés Brix élevés. Plusieurs études ont fait mention de cette évolution pendant la DII (Jiokap et al., 2001b ; Eren et Kaymak-Ertekin, 2006 ; Singh et al., 2008 ; Azoubel et Da-Silva, 2008). En effet, pendant le processus de DII, pendant que les tranches des mangues perdent l'eau sous l'effet de la différence de potentiel chimique entre la membrane semi-perméable des tranches de mangue et la solution de DII, le phénomène d'imprégnation du soluté sur les tranches de mangues a lieu ce qui explique l'augmentation du gain en soluté des tranches de mangues (Raoult-Wack, 1994).

### 3.4. Conditions optimales

La fonction de désirabilité a été utilisée pour faire une optimisation multiréponse. Les objectifs d'optimisation de chacune des réponses choisies pour l'optimisation sont présentés dans le Tableau 8. A l'issue de ces spécifications, nous avons obtenus les points optimaux pour les facteurs, tel que le ratio m/V, temps et °Brix. Le Tableau 8 donne en valeurs réelles, les points optimaux pour chacun des facteurs.

**Tableau 8 :** Valeurs optimales des facteurs et réponses.

Paramètres	Objectifs	Plage		Optimum		Désirabilité
		Min	Max	Valeurs prédites	Valeurs expérimentales	
Ratio P/V (g/ml)	-	6:1	13:1	6:1	6:1	-
Temps (heures)	-	2,268	5,732	4,0744	4,07	-
°Brix (g/100ml)	-	46,8	63,2	61,6	61,6	-
GS	Cible	4	6	5	6,670 ± 1,041	1
PE	Cible	40	60	50	47,626 ± 1,793	1
RDB	Maximisation	4	5	6,716	6,370 ± 0,188	1

Afin de confirmer les réponses prédites, des tests au laboratoire ont été effectués et les résultats expérimentaux sont présentés dans le Tableau 8. Nous constatons que les réponses expérimentales trouvées sont proches des réponses prédites. Donc, nous pouvons valider les conditions optimales trouvées.

Pour mieux comprendre le comportement des tranches de mangues sur les points optimaux trouvés, nous avons fait une cinétique de DII dans ces conditions, dont les résultats sont présentés dans la partie suivante.

### 3.5. Modélisation du transfert de matière pendant la DII

Afin de mieux comprendre le comportement des tranches de mangues pendant la DII, une cinétique de DII a été effectuée en utilisant les conditions opératoires optimales de DII précédemment déterminées. Les résultats expérimentaux sont présentés sur la Figure 4. Il en ressort que la PE et le GS augmentent progressive avec le temps, puis se stabilisent après un certain temps. Ce temps de stabilisation est plus court dans le cas du GS comparé à celui de la PE. Cette stabilisation du GS pourrait être due à la saturation des couches de la matrice végétale en soluté, induisant un ralentissement du départ d'eau du fruit vers la solution de DII. D'où la pseudo-stabilité observée.

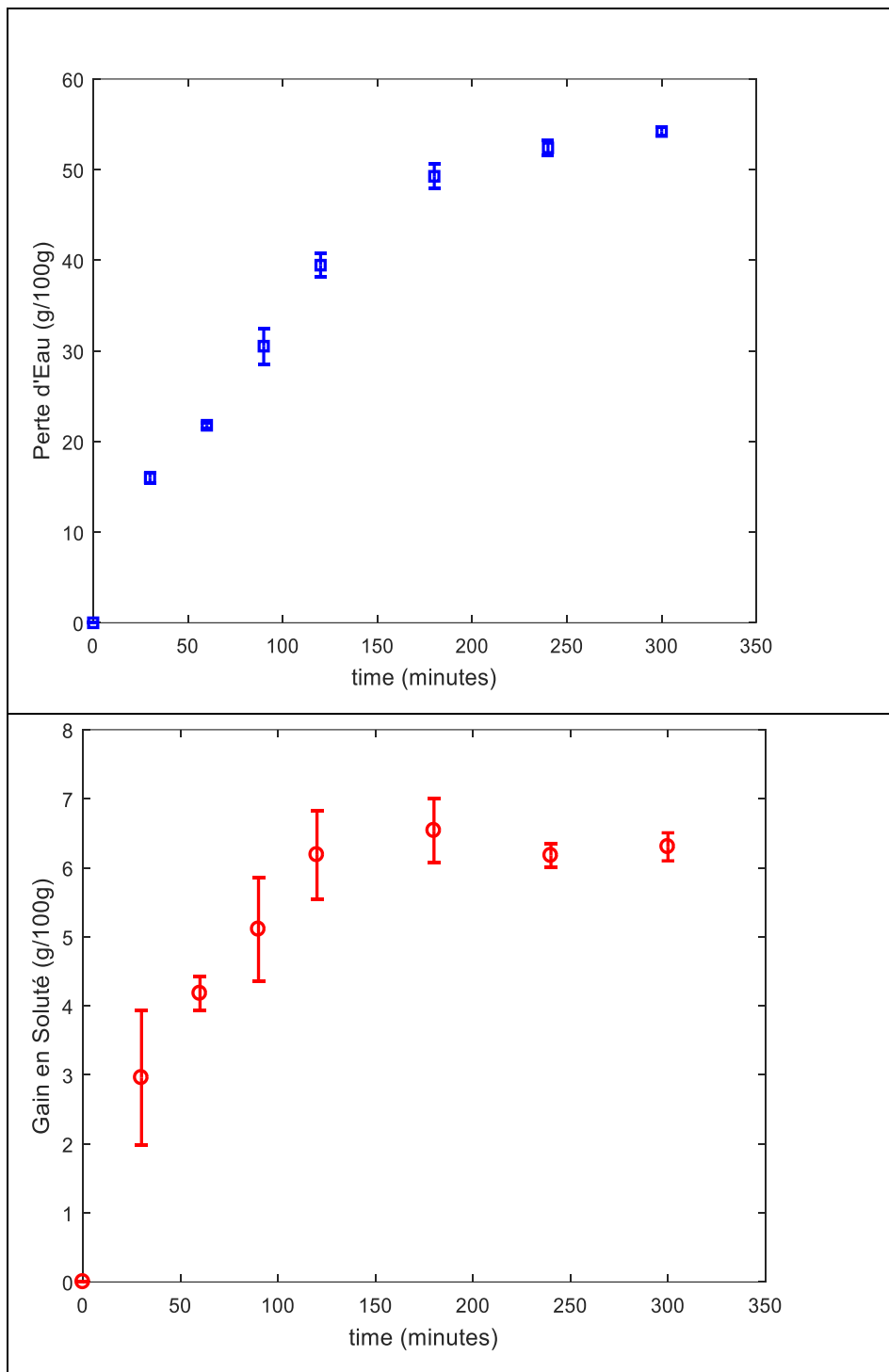


Figure 4 : Evolution de la PE (a) et du GS (b) en fonction du temps

Les valeurs expérimentales de la PE et du GS pendant la DII ont été ajustées aux 8 modèles que nous avons sélectionné de la littérature. Pour trouver le modèle qui décrit mieux le comportement des tranches de mangues pendant la DII, nous avons utilisé le logiciel MATLAB 2017a. Les résultats de classement des modèles sont présentés dans les Tableaux 9 et 10, où, à partir de la somme des minimums, nous avons pu classer les modèles de la plus petite valeur à la plus grande. Il ressort du tableau que les trois modèles pour la PE et le GS, ayant un R<sup>2</sup> tous supérieurs à 0,98 et un MRE tous inférieurs à 0,06 sont le modèle Page, de Weibull et de Crank modifié. De ces résultats, nous pouvons dire que ces trois modèles sont ceux-là qui décrivent mieux le transfert de matière des tranches de mangues pendant la DII. Notons que les modèles de Weibull et de Page sont identiques dans leur construction, d'où les paramètres statistiques identiques obtenus. Les Tableaux 11 et 12 présentent les valeurs des paramètres des différents modèles. Les Figures 5 et 6 présentent les résultats de modélisation des cinétiques par les deux meilleurs modèles testés (Weibull et Crank modifié). Des travaux de Alakali et al. (2006) et Ochoa-Martinez et al. (2007) le modèle Azuara décrit au mieux le comportement des tranches de mangues pendant la DII ce qui n'est pas notre cas. Cette différence peut être due aux conditions opératoires de DII qui ne sont pas identiques et aussi à la méthode de classification.

En exploitant les résultats du modèle de Crank modifié, les coefficients de diffusion de l'eau et du soluté ont été déterminés et sont respectivement de  $1,4314 \cdot 10^{-09} \text{ m}^2/\text{s}$  et de  $3,2374 \cdot 10^{-09} \text{ m}^2/\text{s}$ . Ce résultat indique que le coefficient effectif de diffusion du soluté est en moyenne deux fois plus grand que celui de l'eau. Ces résultats sont contraires à ceux obtenus par de Alakali et al. (2006) qui trouvent que le coefficient de diffusion de la perte d'eau est en moyenne 1,24 fois plus grand que celui obtenu pour le gain en soluté

**Tableau 9 :** Classement des modèles de la perte d'eau (PE) en fonction des critères de validation.

Modèle DII	Critères de validations				
	Rsq	Rsadj	RMSE	MRE	S_min
Weibull	0,9922	0,9891	1,7128	0,0508	1,7822
Page	0,9922	0,9891	1,7128	0,0508	1,7822
Crank modifié	0,9922	0,9891	1,7139	0,0497	1,7824
Peleg	0,9894	0,9876	2,0042	0,0526	2,0798
Azuara	0,9894	0,9876	2,0042	0,0526	2,0798
Magee	0,9763	0,9723	2,9659	0,0677	3,0851
Pénétration	0,9755	0,9755	3,0431	0,0756	3,1678
Crank	0,9216	0,9085	3,4791	0,1005	3,7494

**Tableau 10 :** Classement des modèles du gain en soluté (GS) en fonction des critères de validation.

Modele D2I	Critères de validations				
	Rsq	Rsadj	RMSE	MRE	S_min
Weibull	0,9890	0,9846	0,2373	0,0392	0,3029
Page	0,9890	0,9846	0,2373	0,0392	0,3029
Crank modifié	0,9889	0,9844	0,2390	0,0375	0,3033
Peleg	0,9779	0,9742	0,3367	0,0469	0,4315
Azuara	0,9779	0,9742	0,3367	0,0469	0,4315
Crank	0,9422	0,9325	0,2899	0,0429	0,4581
Magee	0,8718	0,8504	0,7299	0,0944	1,1022
Penetration	0,8298	0,8298	0,9341	0,1435	1,4180

**Tableau 11 :** Paramètres des modèles obtenus lors de la modélisation de la perte d'eau (PE).

Modèle DII	PE <sub>∞</sub>	S	C <sub>z</sub>	k <sub>PE</sub>	A	k	A <sub>w</sub>	α <sub>w</sub>	β <sub>w</sub>	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>
Weibull	58,94							112,6	1,034		
	1							2	4		
Page	58,94						0,00754		1,034		
	1						62		4		
Peleg										1,71	0,0120
										6	6
Azuara	82,92	0,00702									
	1	78									
Magee					-	3,409					
					1,10	7					
					1						
Crank	58,44			0,00704							
				53							
Crank modifié	60,10		0,9950	0,00847							
	3		3	63							
Pénétration						3,323					
						4					

**Tableau 12 :** Paramètres des modèles obtenus lors de la modélisation du gain en soluté (GS).

Modele DII	GS <sub>∞</sub>	S	C <sub>z</sub>	k <sub>GS</sub>	A	k	A <sub>w</sub>	α <sub>w</sub>	β <sub>w</sub>	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>
Weibull	6,428							52,02	1,041		
	8							2	5		
Page	6,428						0,0163		1,041		
	8						13		5		
Peleg										5,678	0,1314
										7	7
Azuara	7,606	0,0231									
	6	51									
Magee					0,9302	0,3755					
					2	1					
Crank	6,439			0,0159							
				25							
Crank modifié	6,456		0,998	0,0191							
	4		9	71							
Pénétration						0,4483					
						8					



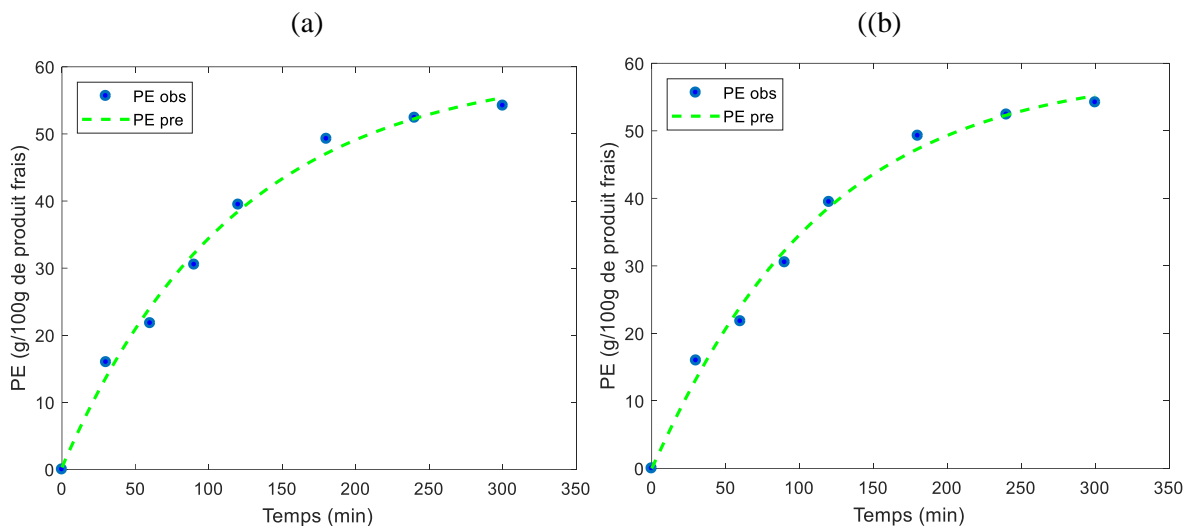


Figure 5 : Modélisation de la cinétique de perte d'eau par les modèles de Crank modifié (a) et de Weibull (b).

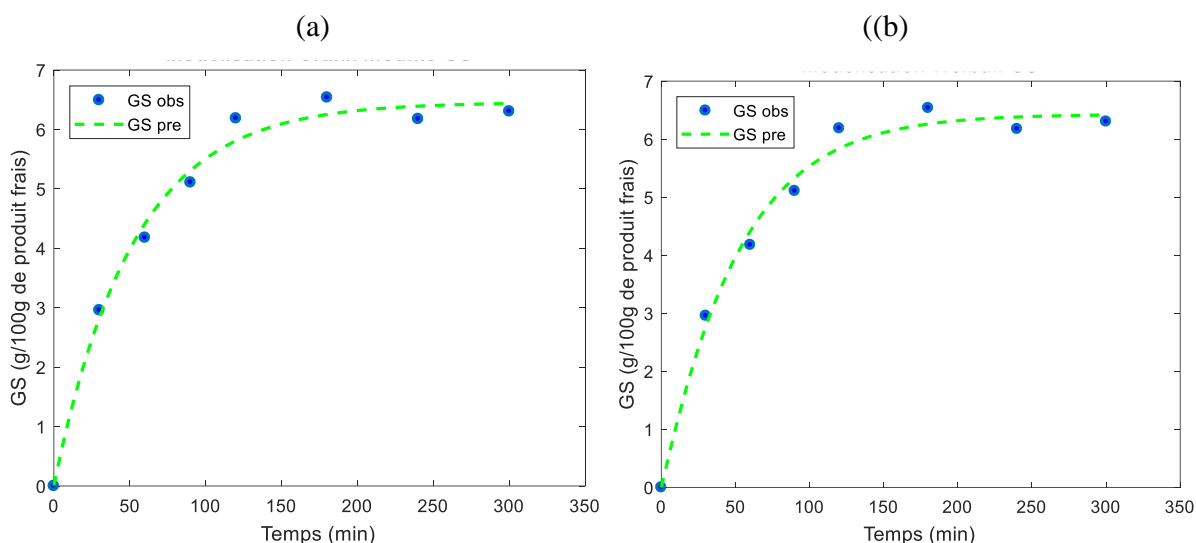


Figure 6 : Modélisation de la cinétique de gain en soluté par les modèles de Crank modifié (a) et de Weibull (b).

#### 4. CONCLUSION

L'objectif de ce travail était de déterminer les conditions optimales de traitement par DII des mangues café de l'Adamaoua, permettant de maximiser la perte d'eau et de minimiser le gain en soluté. L'analyse de la variance a montré l'importance de la prise en compte du ratio m/V, dans la modélisation des transferts d'eau et de soluté dans le processus de DII. En effet, de l'analyse des courbes d'interactions, les ratios faibles maximisent la PE et minimisent le GS. Les conditions optimales de traitement pour une PE maximale et un GS minimal correspondent à un ratio de 6:1 (mL/g), un temps d'immersion de 245 minutes, et une concentration en soluté de 61,6 (g/100 g). Ces conditions optimales ont permis d'obtenir une perte d'eau (PE) de  $47,626 \pm 1,793$  % (g/100 g) et un gain en soluté (GS) de  $6,67 \pm 1,04$  % (g/100 g) et contribuent à réduire la teneur en eau initiale de 25,36 %. Par conséquent, la DII des tranches de mangues pourrait être utilisée efficacement comme prétraitement avant séchage à l'air chaud pour réduire les coûts énergétiques. Cependant, il serait nécessaire de savoir si ce prétraitement pourrait contribuer à réduire les pertes nutritionnelles des tranches de mangue pendant le séchage. De nombreux modèles mathématiques présentés dans la bibliographie pour décrire le comportement des fruits et légumes lors de la DII, nous montrons que les modèles de Weibull et de page présentent les meilleurs critères de validation. Toutefois, ces modèles étant limités

à une gamme de conditions optimales de traitement et étant dépendants de la matrice végétale étudiée, notre travail propose un modèle modifié de Crank pour la DII qui a l'avantage de permettre le calcul des valeurs d'équilibre  $PE_{\infty}$  et  $GS_{\infty}$ , ainsi que les valeurs des coefficients de diffusion de l'eau et du soluté.

## 5. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Ministère de l'Enseignement Supérieur de la République du Cameroun pour son soutien financier à travers le Compte du Fonds Spécial pour la modernisation de la recherche dans les Universités d'Etat (Décret Présidentiel N\_2009/121 du 8 avril 2009).

## 6. CONFLITS D'INTÉRÊT

Les auteurs déclarent qu'il n'y a aucun conflit d'intérêt.

## 7. NOMENCLATURE

### Liste des symboles :

$C_z$	: Paramètre du modèle Crank modifié
$GS_{\infty}$	: Gain en soluté à l'équilibre (kg solutés * $kg^{-1}$ produit initial)
$k_1$ et $k_2$	: Paramètre de Peleg
$PE_{\infty}$	: Perte d'eau à l'équilibre (g d'eau * $g^{-1}$ produit initial)
A et k	: Paramètres du modèle Magee
AADM	: Analyse absolue de déviation de moyenne
$A_f$	: Facteurs d'Exactitudes.
$A_w$	: Constante de déshydratation
$B_f$	: Facteurs de Biais
$DB_0$	: Degré Brix avant DII (°B)
$DB_t$	: Degré Brix après DII (°B)
$Deff_{GS}$	: Coefficient de diffusion du soluté ( $m^2 * s^{-1}$ )
$Deff_{PE}$	: Coefficient de diffusion de l'eau ( $m^2 * s^{-1}$ )
DII	: Déshydratation Imprégnation par Immersion
GS	: Gain en soluté (g de soluté * $g^{-1}$ produit initial)
$k_{PE}$ et $k_{GS}$	: Paramètres du modèle modifié de Crank et de Crank
$K_w$	: Coefficient de transfert de matière (g d'eau ou de soluté * g produit frais. $s^{-1/2}$ )
L	: Longueur caractéristique (m)
m	: Masse (g)
$M_0$	: Masse échantillon à l'instant $t=0$
MRE	: Erreur relative moyenne
MS	: Matière sèche (g)
$M_t$	: Masse échantillon à l'instant t (g)
N	: Nombre d'observation
p	: Nombre de constante
PE	: Perte d'eau (g d'eau * $g^{-1}$ produit initial)

$R^2$	: Coefficient de détermination
$R^2_{adj}$	: Coefficient de détermination ajusté
RDB	: Réduction du degré Brix (%)
RMSE	: Erreur quadratique moyenne
S	: Paramètre du modèle AZUARA ( $s^{-1}$ )
t	: Temps (s)
V	: Volume (mL)
$X_{i,j}$	: Variables de prédiction codées appelées facteurs
$X_{so}$	: Teneur en soluté à l'instant $t=0$
$X_{st}$	: Teneur en soluté à l'instant t
$X_{wo}$	: Teneur en eau base humide à l'instant $t=0$
$X_{wt}$	: Teneur en eau base humide à l'instant t
$Y_{cal}$	: Valeurs calculées du modèle
$Y_{exp}$	: Valeurs expérimentales du modèle
$Y_{i,calc}$	: Réponse prédite
$Y_{i,exp}$	: Réponse expérimentale

**Lettres grecques :**

$\beta_w$	: Paramètre du modèle Weibull
$\alpha_w$	: Paramètre du modèle Weibull (s)
$\beta_{0,i,ii,ij}$	: Coefficients de régression
$\varepsilon$	: Erreur totale (différence entre les valeurs observées et les valeurs estimées de la réponse).

**8. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- Ade-Omowaye B., Rastogi N., Angersbach A., Knorr D., 2003. Combined effects of pulsed electric field pre-treatment and partial osmotic dehydration on air drying behavior of red bell pepper. *J. Food Eng.*, **60**, 89–98.
- AFNOR, 1982. Recueil des normes françaises des produits dérivés des fruits et légumes, 1st edn. Association Française de Normalisation, Paris, France.
- Albagnac P.G., Varoquaux J. & Montigaud C.I., 2002. Technologies de transformation des fruits. Paris, Lavoisier-Tec & Doc.
- AOAC, 1990. International, Official methods of analysis, 15<sup>th</sup> edn., edited by Kenneth Helrich, published by the association of Official Analytical Chemists, Inc, Arlington, Virginia 22201 USA.
- Araujo E.A.F. & Murr F.E.X., 2002. Optimization of osmotic dehydration of nectarine (*Prunus persica*) using response surface methodology. In *Proceeding of the 13th international drying symposium*, vol. **B**, Beijing, China.
- Assis F.R., Morais R.M.S.C. and Morais A.M.M.B., 2016. Mass transfer in osmotic dehydration of food products: comparison between mathematical models. *Food Eng. Rev.*, **8**(2), 116–133.
- Azoubel M. et Da-Silva F., 2008. optimisation of osmotic dehydration of ‘Tommy Atkins’ mango fruit. *International Journal of Food Science and Technology*, **43**, 1276–1280.
- Azuara E., Beristain C. I. and Garcia H. S., 1992. Development of a mathematical model to predict kinetics of osmotic dehydration. *J. Food Sci. Technol.*, **29**, 239–242.
- Bafode B., 1988. Projet de transformation et de conditionnement des mangues à Boundiali en Côte d’Ivoire, SIARC (Section des ingénieurs alimentaires / région chaude) Montpellier, 87p.

- Baş D. et Boyac I.H., 2007. modeling and optimization I: Usability of response surface methodology. *Journal of Food Engineering*, **78**, 836–845.
- Box, G. E. P., & Draper, N. R., 1987. Empirical model building and response surfaces. New York, NY: John Wiley and Sons.
- Bradley RL Jr, 2010. Moisture and total solids analysis, Ch. 6. In: Nielsen SS (ed) Food analysis, 4th edn. Springer, New York.
- Cao H., Zhang M., Mujumbar S., Du W-H. et Sun J-C., 2006. optimization of osmotic dehydration of kiwifruit, *Drying Technol.*, Taylor & Francis, **24**, 89–94.
- Castello M., Igual M., Fito P. & 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.
- Charreau A. et Cavaille R., 1995. *Séchage : Théorie et calculs*, © Techniques de l'Ingénieur, traité Génie des procédés, 25p.
- Crank J., 1975. The Mathematics of Diffusion, 2nd Ed., Clarendon Press, Oxford.
- Cunha L.M., Oliveira F.A.R., Aboim A.P., Frias J.M. and Pinheiro-Torres A., 2001. Stochastic approach to the modelling of water losses during osmotic dehydration and improved parameter estimation. *Int. J. Food Sci. Technol.*, **36**, 253–262.
- Dalgaard P. et Jorgensen L.V., 1998, predicted and observed growth of *Listeria monocytogenes* in seafood challenge tests and in naturally contaminated cold smoked salmon. *Int. J. Food Microbiol.* **40** (1-2), 105–115.
- Derringer G., & Suich R., 1980. simultaneous optimization of several response variables. *Journal of Quality Technology*, **12**(4), 214–219;
- Eren et Kaymak-Ertekin, 2006, optimization of osmotic dehydration of potato using response surface methodology. *Journal of Food Engineering*, **79**, 344–352.
- Fernandes F., Rodrigues S., Gaspareto O.C.P. & Oliveira E.L., 2006. Optimization of osmotic dehydration of papaya followed by air-drying. *Food Res. Int.*, **39**, 492–498.
- Giovanni M., 1983, Response surface methodology and product optimization. *J. Food Technol.*, **37**, 41–45.
- Goupy J., 2001, Introduction aux Plans d'expériences, Dunod. Paris. 336 p.
- Harrington E., 1965, the desirability function, *Industrial Quality Control*, **21**, 494–498.
- Hawkes J. & Flink J.M., 1978. Osmotic concentration of fruits slices prior to freeze dehydration. *J. Food Process. Preserv.*, **2**, 265–284.
- Islam M.N. and Flink J.N., 1982. Dehydration of potatoes: Osmotic concentration of food prior to freezing. *Journal of Food Technology*, **7**, 387–403.
- Jaeger de Carvalho L. M., Gomes P. B., Godoy R., Pacheco S., Pedro Henrique Monte F., Viana de Carvalho J. L., Nutti M. R., Neves C. L., Vieira C. R., Ramos S. R., 2012. Total carotenoid content  $\alpha$  carotene and  $\beta$  carotene, of landrace pumpkins. *Food Research International*, **47**, 337–340.
- Jiokap Nono Y., Giroux F. Bernard C., & Raoult Wack A.L., 2001a. Etude des paramètres de contrôle et de commande du procédé de deshydratation impregnation immersion par immersion sur système probatoire automatisé : application au traitement des pommes golden. *Journal of Food Engineering*, **50**, 203–210.
- Jiokap Nono Y., Nuadjea G.B., Raoult Wack A.L. & Giroux F., 2001b. Comportement de certains fruits tropicaux traités par déshydratation-impregnation par immersion dans une solution de saccharose. *Fruits*, **56**, 75–83.
- Jiokap Nono Y., Nuadjea G.B., Raoult Wack A.L. & Giroux F., 2001c. Déshydratation-impregnation par immersion de rondelles de mangue (*Mangifera indica*) : influence de la température et de la concentration de la solution sur les cinétiques de certains éléments constitutifs du fruit. *Fruits*, **56**, 169–177.
- Joglekar A.M. et May A.T., 1987, product excellence through design of experiments. *Cereal Food. World*, **32**, 857–868.
- Karel M., 1975. Osmotic drying. Principles of Food Science (Part II) (ed. Fennema, O.R.). Marcel Dekker, NY, USA, 348–351.

- Khuri A.I. & Cornell J.A., 1996. Response surfaces: Designs and analyses (2nd ed.). New York: Marcel Dekker Inc., 190p.
- Labuza T.P. and Tannenbaum S.R., 1972. Nutrient Losses During Drying and Storage of Dehydrated Foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* **3**(2), 217–240.
- Lenart A., 1996. Osmo-convective drying of fruits and vegetables: technology and application. *Drying Technol.*, **14**, 391–413.
- Lerici C.R., Pinnavaia G., Rosa M.D. and Baatolucci L., 1985. Osmotic dehydration of fruit: Influence of osmotic agents on drying behaviour and product quality. *Journal of Food Science*, **50**, 1217–1219.
- Madamba P. et Lopez R., 2002. optimization of the osmotic dehydration of mango (*Mangifera indica* L.) slices. *Drying Technol.*, **20**, 1227–1242;
- Manivannan P. Et. Rajasimman M., optimization of process parameters for the osmotic dehydration of beetroot in sugar solution. *Journal of food process engineering*, **34**, 804–825.
- Mujumdar A.S., 2006. Handbook of Industrial Drying, 3rd Ed; CRC Press: Boca Raton, FL.
- Page G.; 1949. Factors influencing the maximum rates of air-drying shelled corn in thin layer. Purdue University, Purdue, IN.
- Peleg M., 1988. An empirical model for the description of moisture sorption curves. *J. Food Sci. Technol.*, **53**, 1216–1219.
- Ponting J.D., 1973. Osmotic dehydration of fruits - Recent modifications and applications. *Process Biochem.*, **20**, 18–20.
- Raoult – Wack A., Guilbert S. and Le Maguer M., 1991. Simultaneous water and solute transport in shrinking media, Applications of Osmotic dehydration. *Drying Technology-An International Journal*, **9**, 589–612.
- Raoult-Wack A.L., 1994. Recent advances in the osmotic dehydration of foods. *Food Sci. Technol.*, **5**, 255–260.
- Rastogi N.K. and Niranjana K. 1998. Enhanced mass transfer during osmotic dehydration of high pressure treated pineapple. *J. Food Sci. Technol.* **63**, 508–511.
- Rivier M., Méot J.-M., Ferré T. et Briard M., 2010, *Le séchage des mangues*, Éditions Quæ, CTA, 116p.
- Sadler G.D., Murphy P.A., 2010. pH and titratable acidity. Ch. 13. In: Nielsen SS (ed) Food analysis, 4th edn. Springer, New York.
- Sawadogo-Lingani et Traore, 2001, composition chimique et valeur nutritive de la mangue amélie (*Mangifera indica* L.) du Burkina Faso. *Journal des Sciences*, **2**(1), 35–39.
- Sharma GP, Prasad S., 2005. Optimization of process parameters for microwave drying of garlic cloves. *Journal of Food Engineering*, **75**, 441–446.
- Sogi S., Siddiq M. et Dolan K., 2014. Total phenolics, carotenoids and antioxidant properties of Tommy Atkin mango cubes as affected by drying techniques. *Food Science and Technology*, 1–5.
- Temple L., 2001, *quantification des productions et des échanges de fruits et légumes au Cameroun*. Cahier d'Agriculture, **119**(10), 87–94 ;
- Wang N., Brennan J., 1995. changes in structure, density and porosity of potato during dehydration. *Journal of Food Engineering*, **24**(1), 61–76.
- Wang W.C. & Sastry S.K., 2000. Effects of thermal and electrothermal pretreatments on hot air-drying rate of vegetable tissue. *J. Food Process Eng.*, **23**, 299–319.
- Whitmore T., 1975, *Tropical Rainforest of the Far East*, Oxford: Clarendon Press.
- Wolff J. P., 1968, Manuel d'analyse des corps gras ; Azoulay éd., Paris (France), 519 p.
- Zou K., Teng J., Huang L., Dai X. et Wei B., 2012. effect of osmotic pretreatment on quality of mango chips by explosion puffing drying. *Food Science and Technology*, **51**, 253–259.